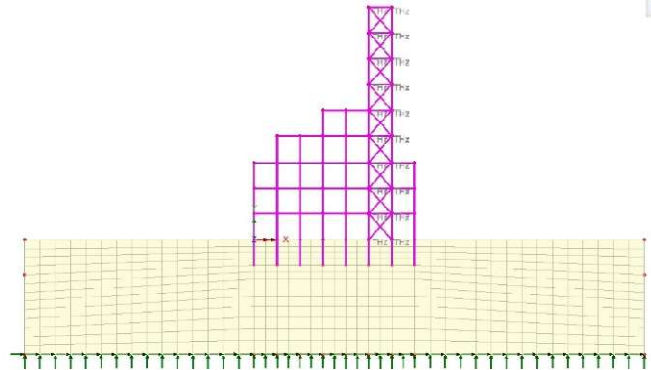


IMDPlus 를 이용한 2 차원 프레임 구조의 지진응답해석

LUSAS 버전:	24.0
소프트웨어 제품:	전체
제품 옵션:	IMDPlus
참고: 이 예제는 LUSAS Teaching and Training Version 에서 해석할 수 없습니다.	

개요

이 예제에서는 탄성 지반 위에 놓인 2 차원 평면 프레임의 지진 응답을 살펴봅니다. 이 모델은 '**Seismic Response of a Plane Frame**' 예제를 확장한 것입니다.



단위는 N, m, kg, s, C 를 사용합니다.

목표

아래 내용을 확인합니다.

- ☐ 타워 상단의 변위, 속도, 가속도
- ☐ 타워 상단의 이차 응답 스펙트럼
- ☐ 타워 하단 기둥의 힘 및 모멘트
- ☐ 타워 하단 모든 기둥의 평균 힘/모멘트 및 최대 힘/모멘트

키워드

2D, Frame, Seismic, Time Domain, Response, Mass Participation, Interactive Modal Dynamics, Excitation, Eigenvalue, Secondary Response Spectra.

관련 파일

IMDPlus_2D_tower.lvb 는 구조물의 모델 생성을 위한 스크립트 파일입니다.

horizontal.prn 과 **vertical.prn** 은 수평·연직 방향 지진 가속도를 정의하는 파일입니다. 이 두 파일에는 각각 두 개의 지진 기록이 담겨 있으며, 하나는

1940 년 엘센트로(EI Centro) 지진, 다른 하나는 1994 년 노스리지 (Northridge) 지진에 대한 것입니다.

설명

이 예제에서는 '**Seismic Response of a 2D Frame (Frequency domain)**' 예제를 다시 살펴봅니다. 이번에는 프레임이 평면변형을 탄성 지반 위에 놓이며, IMDPlus 를 이용해 구조물의 응답을 시간 영역에서 평가합니다.

모델은 콘크리트 기둥과 보 부재, 그리고 양단 힌지 접합된 강재 대각 가새 부재를 모두 썩 보 요소로 구성했습니다. 변형 형상을 더 세밀하게 표현할 수 있도록, 구조 부재를 나타내는 보 요소 수를 라인당 1 개에서 4 개로 늘렸습니다. 이와 함께 프레임에 지정되어 있던 모든 지점 구속을 제거하고, 각 기둥 하단을 탄성 지반에 매입할 수 있도록 기둥 하단에 4.5m 길이를 추가했습니다.

탄성 지반은 가로 108m, 세로 20m 크기의 블록으로 모델링했으며, 하단은 완전 구속하고 양쪽 측면에는 주기적 병진 구속(cyclic translation constraint)을 지정했습니다. 이 구속 조건은 실제 물리적 구속을 적용하지 않고도 탄성 지반의 측면을 지지할 수 있게 해 주며, 그 결과 탄성 지반 내에서 직접적인 거동과 전단 거동이 모두 나타날 수 있습니다.

지진 응답 해석은 크게 두 단계로 나뉘어 수행됩니다. 먼저 고유진동수 해석을 수행합니다. 이는 구조물과 탄성 지반을 합한 시스템의 처음 50 개 고유 진동 모드를 계산하는 데 사용됩니다. 이때 얻어진 고유값, 진동수, 고유벡터(모드 형상)는 저장되어 이후의 IMDPlus 해석에 사용됩니다. 고유값 해석으로 고유진동수는 얻을 수 있지만, 변형이나 응력·모멘트의 크기에 관한 정보는 정량적이지 않습니다.

해석의 두 번째 단계에서는 Interactive Modal Dynamics(IMD) 기능을 이용해 향상된 시간 영역 해석을 수행하는 IMDPlus 옵션을 사용합니다.

IMDPlus 를 이용한 2 차원 프레임의 지진 응답 해석(시간 영역)

이는 스펙트럴 응답 해석을 수행하는 대신 사용할 수 있는 방법으로, 스펙트럴 가진 곡선 대신 가속도 시간이력을 이용해 구조물에 가진을 가할 수 있게 해 줍니다.

IMDPlus 해석에서는 모델 전체 좌표계 방향의 가속도 시간이력으로 정의되는 지점 조건 가진이 구조물에 작용합니다. 이 예제에서는 이 가진이 수평·연직 방향 가속도의 형태로 탄성 지반 하단을 따라 작용한다고 가정합니다. 다만 지반 표면에서 기록된 지진 응답을 해석에 입력할 심도별 가속도 시간이력으로 변환하는 디컨볼루션(deconvolution) 과정은 수행하지 않았다는 점에 유의해야 합니다. 따라서 이 해석에서의 지반면 가속도는 실제 계측값과 일치하지 않습니다. 앞서 설명한 대로, 해석에는 두 개의 지진 기록이 사용되며, 첫 번째는 1940 년 엘센트로 지진, 두 번째는 1994 년 노스리지 지진입니다. 두 지진에 대한 응답은 하나의 해석에서 함께 계산됩니다. 이 예제에서는 각 지진 이벤트의 처음 10 초만 해석합니다.

모델링

LUSAS 모델러 실행

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

모델 생성

File> New...

파일 이름을 **IMDPlus 2D Tower** 로 입력합니다.

- 기본값인 User-defined 작업 폴더를 사용합니다.
- **Analysis category** 가 **2D Inplane** 으로 설정되어 있는지 확인합니다.
- OK 버튼을 클릭합니다.

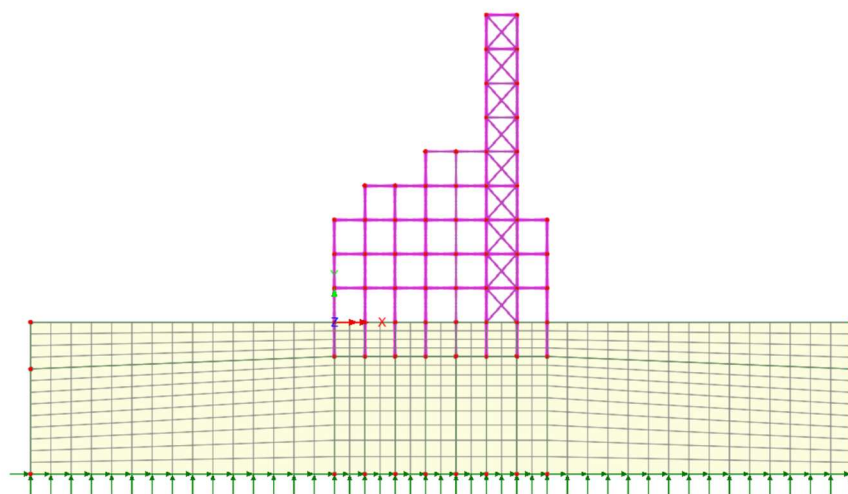
참고. 스크립트를 실행해 초기 모델을 구축할 예정이라면

다른 새 모델 정보를 추가로 입력할 필요가 없습니다. 스크립트의 내용이 다른 설정을 모두 덮어쓰기 때문입니다.

File> Script> Run Script...

이 예제에 필요한 모델을 만들려면, 위의 메뉴를 이용하여, 다운로드하여 원하는 폴더에 저장해 둔 스크립트 파일 **IMDPlus_2D_tower.lvb**를 엽니다.

잠시 후 다음과 같은 건물 모델 화면이 표시됩니다.



File> Save As...

모델을 IMDPlus 2D Tower 라는 새 폴더에 저장합니다. 이렇게 하면 이 예제에서 IMDPlus 로 생성되는 관련 파일들을 다른 해석과 분리해서 관리할 수 있어 좋은 습관입니다.

참고. 이 해석에는 정적 구조 하중이 필요하지 않습니다. 결과 처리 과정에서는 오직 고유진동수 해석 결과를 바탕으로 한 동적 하중만을 고려하기 때문입니다.

이제 고유진동수를 추출하는 데 필요한 컨트롤을 정의하여 모델링을 마무리합니다.

고유값 컨트롤 정의

고유값 컨트롤은 하중 케이스의 속성으로 정의됩니다.

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

Eigenvalue 대화상자가 나타납니다.

- **Number of eigenvalues** 를 **50** 으로 설정합니다.
- **Shift to be applied** 가 **0** 으로 설정되어 있는지 확인합니다.
- **Type of eigensolver** 가 **Default** 로 설정되어 있는지 확인합니다.

참고. **Eigenvalue normalisation** 은 기본적으로 **Mass** 로 설정됩니다. 이는 고유벡터를 이후 IMD 해석에 사용하려는 경우 반드시 필요합니다.

- OK 버튼을 클릭해 마칩니다.
- 모델 파일을 저장합니다.

해석 실행

해석 실행

- 모델이 로드된 상태에서 **Solve** 버튼을 클릭하면 Solve Now 대화상자가 표시됩니다.
- OK 버튼을 클릭해 해석을 실행합니다.

모델 정보로부터 LUSAS 데이터파일이 생성됩니다. LUSAS Solver 는 이 데이터파일을 이용해 해석을 수행합니다.

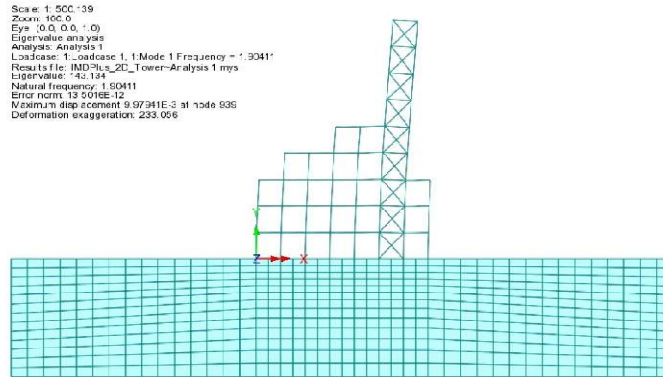
결과 확인

해석을 LUSAS 모델러 내에서 실행한 경우, 결과는 현재 모델 위에 로드되며 각 고유값에 대한 하중 케이스 결과는 **Treeview> Analyses** 탭에서 확인할 수 있습니다. Eigenvalue 1 이 기본적으로 활성화되어 있습니다.

모드 형상 표시

- **Treeview> Layer** 탭에서 Mesh, Geometry, Attributes 레이어의 표시를 끕니다.
- 아무 항목도 선택하지 않은 상태에서 뷰 창의 빈 곳을 마우스 오른쪽 버튼으로 클릭하고 **Deformed mesh** 옵션을 선택해 트리뷰에 변형 메쉬 레이어를 추가합니다. OK 버튼을 클릭하면 Eigenvalue 1 에 대한 변형 메쉬가 표시됩니다.
- 트리뷰 하단에서 **Window summary** 옵션을 선택하고 **Details...** 버튼을 클릭합니다. Window summary properties 대화상자에서 위치를 **15,-15** 로 설정하고(모델 단위가 아님에 유의) OK 버튼을 클릭해 뷰 창으로 돌아갑니다.

IMDPlus 를 이용한 2 차원 프레임의 지진 응답 해석(시간 영역)



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

참고. Window summary 에는 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.

이런 방식으로 각 Eigenvalue 를 활성화하면 모든 모드 형상에 대한 변형 메쉬를 확인할 수 있습니다.

트리뷰에서 **Mode 2 Frequency=6.12185** 항목을 마우스 오른쪽 버튼으로 클릭하고 **Set Active** 옵션을 선택합니다. 해당 고유모드에 대한 변형 메쉬 플롯이 표시됩니다.

고유값 결과 출력

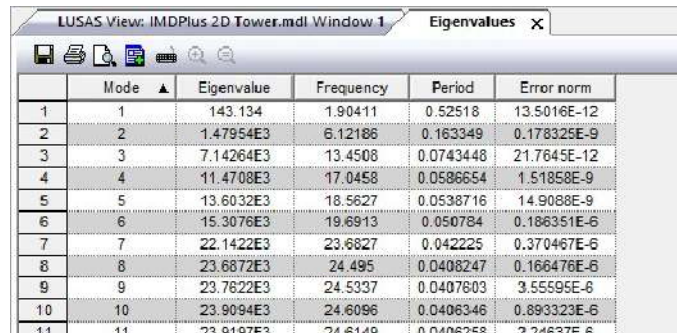
Utilities > Print Results Wizard...

구조물 전체에 대한 고유값 결과는 Text Output 창에 표시할 수 있습니다.

Loadcase 1 에 대해 결과 유형으로 **Eigenvalues** 를 선택합니다. available results 패널에서 **Eigenvalues (Frequency)**를 선택하고, **Display now** 가 선택되어 있는지 확인한 뒤 OK 를 클릭합니다.

고유값 결과가 표시되며, Utilities 트리뷰에 Print Results Wizard 항목이 추가됩니다.

여기서는 확인을 위해 처음 10 개 모드만 표시합니다.



	Mode ▲	Eigenvalue	Frequency	Period	Error norm
1	1	143.134	1.90411	0.52518	13.5016E-12
2	2	1.47954E3	6.12186	0.163349	0.178325E-9
3	3	7.14264E3	13.4508	0.0743448	21.7645E-12
4	4	11.4708E3	17.0458	0.0586654	1.51858E-9
5	5	13.6032E3	18.5627	0.0538716	14.9088E-9
6	6	15.3076E3	19.6913	0.050784	0.186351E-6
7	7	22.1422E3	23.6827	0.042225	0.370467E-6
8	8	23.6872E3	24.495	0.0408247	0.166476E-6
9	9	23.7822E3	24.5337	0.0407803	3.55595E-6
10	10	23.9094E3	24.6096	0.0406346	0.893323E-6
11	11	23.9107E3	24.6149	0.0406258	2.24637E-6

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. PRW 유틸리티의 컨텍스트 메뉴에서 'Show results' 메뉴 항목을 선택하면 다시 표시할 수 있습니다.

질량 참여 계수 확인

참고. IMDPlus 해석을 제대로 수행하려면 전체 질량 중 상당 부분이 해석에 반영되었는지 확인해야 합니다. 이를 위해 전체 좌표계 방향으로 전체 질량의

IMDPlus 를 이용한 2 차원 프레임의 지진 응답 해석(시간 영역)

약 90%가 반영되었는지 확인해야 합니다. 90%에 미치지 못하더라도, 누락된 진동 모드가 입력 가속도 시간이력에 의해 가진되지 않거나 구조물의 상당 부분이 해당 방향으로 지점에 구속되어 그 모드에 참여할 수 없는 경우에만해서는 추가 모드를 포함하지 않아도 됩니다. 포함할 진동 모드의 적정 범위는 해석마다 다르지만, 전체 질량 중 상당 부분이 반영되었는지 확인하지 않으면 중요한 모드를 놓쳐 이후 해석 결과에 오류가 생길 수 있습니다.

Utilities > Print Results Wizard...

결과 유형으로 **Eigenvalues** 를 선택합니다. Loadcase 1 에 대해 **available results** 패널에서 **Eigenvalues (Frequency)**를 선택 해제하고 **Sum mass participation factors** 를 선택한 뒤 OK 를 클릭합니다. **Sum Mass Participation Factors** 결과가 결과 출력 창에 표시됩니다.

여기서는 확인을 위해 모드 40 에서 50 까지만 표시합니다. 90% 값에 도달하지 못했음을 확인할 수 있으며, 이는 아래에서 설명합니다.

LUSAS View: IMDPlus 2D Tower.mdl Window: Eigenvalues Sum mass participation factors x									
	Mode	Sum Mass X	Sum Mass Y	Sum Mass Z	Sum Mass THX	Sum Mass THY	Sum Mass THZ	Frequency	Period
39	39	0.812738	0.130162	0.0	0.0	0.0	0.101855E-3	32.1217	0.03111318
40	40	0.812738	0.295270	0.0	0.0	0.0	0.101057E-3	32.2335	0.0310237
41	41	0.812738	0.650551	0.0	0.0	0.0	0.101860E-3	32.2812	0.0309778
42	42	0.812738	0.754139	0.0	0.0	0.0	0.102266E-3	32.8339	0.0306429
43	43	0.812739	0.75427	0.0	0.0	0.0	0.102298E-3	33.0136	0.0302905
44	44	0.81274	0.754271	0.0	0.0	0.0	0.102327E-3	33.2692	0.0300579
45	45	0.812744	0.75751	0.0	0.0	0.0	0.104477E-3	33.3605	0.0299756
46	46	0.812744	0.700225	0.0	0.0	0.0	0.104400E-3	34.205	0.0291043
47	47	0.812746	0.705982	0.0	0.0	0.0	0.106266E-3	34.5041	0.028882
48	48	0.81276	0.789704	0.0	0.0	0.0	0.106277E-3	34.5637	0.0289321
49	49	0.81276	0.789707	0.0	0.0	0.0	0.106269E-3	34.8618	0.0286647
50	50	0.81276	0.789756	0.0	0.0	0.0	0.106596E-3	35.1707	0.0284328

참고. 이 해석에서는 상당한 비율의 질량이 탄성 지반

하단을 따라 구속되어 있습니다. 50 개의 진동 모드에 대해, 수평 및 연직 방향으로 각각 전체 질량의 **81.2%**와 **78.9%**가 반영됩니다. 수평·연직 방향 모두에서 전체 질량의 **90%**를 달성하려면 상한 주파수 **97.2Hz** 에 해당하는 160 개의 진동 모드가 필요합니다. 다만 이 예제에서는 진동 모드 수를 50 개로 제한했습니다.

결과 출력 창을 닫습니다.

지진 응답 해석

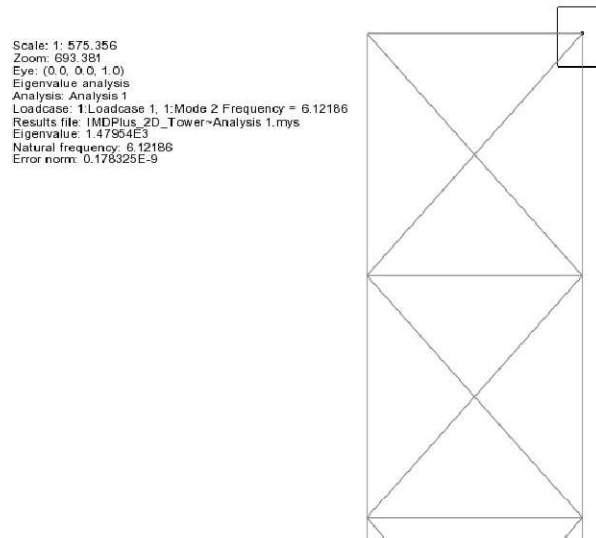
지진 응답 계산은 IMDPlus(Interactive Modal Dynamics) 기능을 이용해 수행합니다. 이를 위해 가진을 정의하고 필요한 결과를 지정합니다. 이 예제에서는 먼저 타워 우측 상단 모서리 절점의 응답을 살펴봅니다.

참고. 지진 응답 해석에서는 추가적인 감쇠 정보도 설정할 수 있습니다. 고유진동수 해석 결과와 달리, 지진 응답으로 얻는 출력 값은 실제 설계 값입니다.

- **Treeview> Layer** 탭에서 **Deformed Mesh** 레이어의 표시를 끕니다.
- **Treeview> Layer** 탭에서 **Mesh** 레이어 이름을 더블클릭합니다. OK 버튼을 클릭합니다.

이렇게 하면 해당 레이어가 표시됩니다.

- 타워 상단을 확대해 우측 상단 절점만 선택합니다.



지진 매개변수 정의

참고. 이후 예제 진행 시 IMDPlus 메뉴 선택 과정을 간소화할 수 있도록(즉 Analyses > IMDPlus 메뉴에서 IMDPlus 메뉴 항목을 선택하는 대신), LUSAS 모델러에서 IMDPlus 툴바를 활성화하는 것이 좋습니다. 방법은 다음과 같습니다.

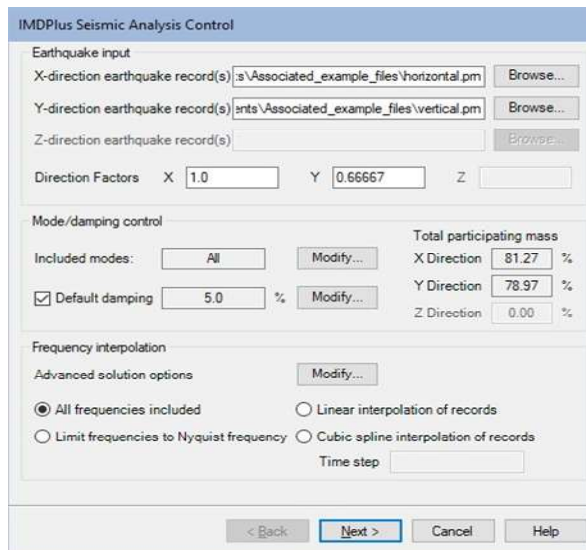
View > Toolbars... 메뉴 명령을 선택하고, Toolbars 탭을 선택한 뒤, 목록에서 IMDPlus 옵션을 선택하고 Close 를 클릭합니다.

IMDPlus 툴바가 활성화된 경우, **Seismic analysis**  버튼을 클릭하면 IMDPlus 대화상자로 이동하는 다른 관련 툴바 버튼(시즈믹 톨 버튼)들이 활성화됩니다.

Analyses> IMDPlus> >Seismic...

- IMDPlus Seismic Analysis Control 대화상자를 엽니다.

지진 해석에 필요한 입력값은 IMDPlus Seismic Analysis Control 대화상자에서 정의합니다. 입력값은 지진 가속도 기록, 포함할 모드와 감쇠, 그리고 보간 옵션으로 구성됩니다.



The image shows the 'IMDPlus Seismic Analysis Control' dialog box. It is divided into several sections: 'Earthquake input' with fields for X, Y, and Z direction earthquake records and 'Browse...' buttons; 'Direction Factors' with input fields for X (1.0), Y (0.66667), and Z; 'Mode/damping control' with 'Included modes' set to 'All', 'Default damping' checked at 5.0%, and a table for 'Total participating mass' showing X Direction at 81.27%, Y Direction at 78.97%, and Z Direction at 0.00%; 'Frequency interpolation' with 'Advanced solution options' set to 'All frequencies included' and 'Time step' set to 0.05; and a bottom section with '< Back', 'Next >', 'Cancel', and 'Help' buttons.

Total participating mass	
X Direction	81.27 %
Y Direction	78.97 %
Z Direction	0.00 %

- Earthquake Input 항목의 **X-Direction Earthquake Record(s)**에서, 관련 파일을 모두 다운로드한 폴더로 이동해 **horizontal.prn** 을 선택합니다.
- **Y-Direction Earthquake Record(s)**에서도 같은 폴더로 이동해 **vertical.prn** 을 선택합니다.
- **X, Y** 방향의 **Direction Factors** 가 각각 1 과 **0.66667** 로 설정되어 있는지 확인합니다.
- Mode/Damping Control 항목에서 **Included modes** 가 **All** 로 설정되어 있는지 확인합니다. 그렇지 않다면 **Modify...** 버튼을 클릭해 **All modes** 옵션을 켭니다.
- **Default damping (5%)**이 선택되어 있는지 확인합니다. 다른 값이 표시되어 있으면 **Modify...** 버튼을 클릭해 **Default damping** 을 5 로 설정합니다.
- Frequency Interpolation 항목에서 **Modify...** 버튼을 클릭해 고급 해석 옵션을 변경합니다. **Defaults** 버튼을 클릭해 기본 옵션을 적용하고 **OK** 버튼을 클릭합니다.
- **All frequencies included** 옵션이 선택되어 있는지 확인합니다.
- **Next** 버튼을 클릭해 IMDPlus Output Control 대화상자로 진행합니다. 전체 질량 참여율이 90% 미만이라는 메시지가 표시되면, 이는 이미 확인한 사항이므로(질량 참여 계수 확인 참고) **Yes** 를 선택합니다.

IMDPlus Output Control 대화상자가 표시됩니다.

IMDPlus Seismic Analysis Control 대화상자 관련 참고 사항

Seismic Analysis Control 대화상자에서는 방향별 지진 기록 파일 이름을 직접 입력하는 대신 Browse 버튼을 사용할 수 있습니다. 각 파일을 불러올 때 형식이 올바른지 내용을 확인합니다.

- ☐ 모드에 대한 Modify 대화상자에서는 개별 모드를 지진 해석에 포함하거나 제외할 수 있으며, 가진 방향별 전체 질량 참여율이 표시됩니다.

IMDPlus 를 이용한 2 차원 프레임의 지진 응답 해석(시간 영역)

□ 감쇠에 대한 Modify 대화상자에서는, 원래의 고유값 해석에 점성 모달 감쇠가 포함된 경우 과도 감쇠(overdamped) 모드의 포함 여부를 조정할 수 있습니다. 점성 모달 감쇠를 포함하려면 모델에 지정된 재료 속성에 Rayleigh 감쇠 매개변수를 정의하거나, 별도의 감쇠 속성을 정의해 모델에 지정해야 합니다. 이를 통해 단계별 동적 해석을 직접 재현할 수 있으며 주파수에 따라 달라지는 감쇠도 포함할 수 있습니다.

□ 고급 해석 옵션에 대한 Modify 대화상자에서는 IMDPlus 해석에 사용할 시간 적분 기법을 선택할 수 있습니다. Hilber Hughes Taylor(HHT) 기법 또는 Duhamel 적분 중 하나를 사용할 수 있습니다.

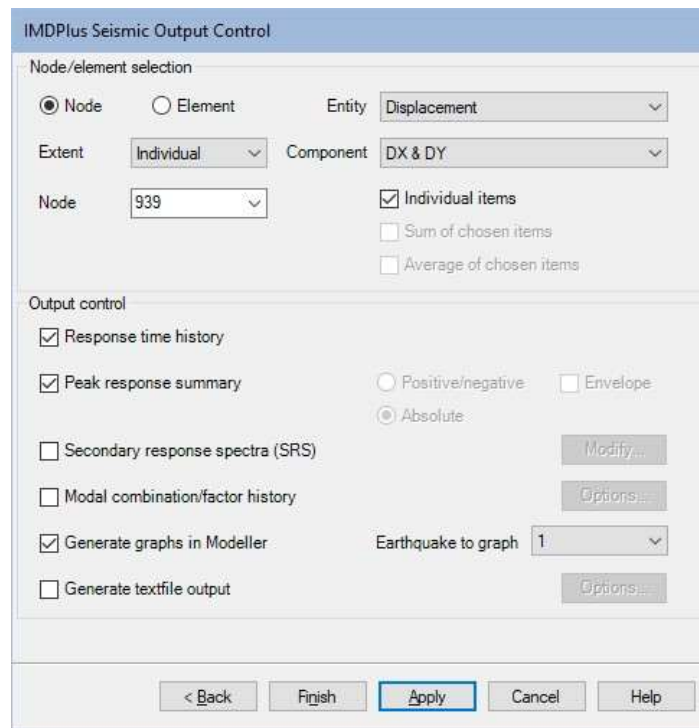
IMDPlus 에서는 네 가지 보간 방법을 사용할 수 있습니다. 기본값인 All frequencies included 는 고유값 해석에 포함된 모든 주파수를 이용해 지진 해석을 수행합니다. Limit frequencies to Nyquist frequency 는 포함되는 주파수를 나이퀴스트(Nyquist) 주파수로 제한하며, 이는 지진 기록의 시간 간격에 의해 결정되고 $1/2\delta t$ 로 정의됩니다. Linear interpolation of records 는 해석에 다른 시간 간격을 지정할 수 있게 하며, 이 경우 지진 기록이 해당 시간 간격에 맞춰 선형 보간됩니다. Cubic spline interpolation of records 역시 다른 시간 간격을 지정할 수 있게 하며, 이 경우 지진 기록이 3 차 스플라인으로 보간됩니다. 이 마지막 보간 방식은 실측 지진 기록에는 일반적으로 사용하지 않는 것이 좋은데, 최대 응답을 평활화(smoothing) 할 수 있기 때문입니다. 다만 인공 합성 지진 기록에는 더 적합한 경우가 많습니다.

변위 플롯

먼저 타워 상단의 변위를 살펴봅니다. IMDPlus Output Control 대화상자에 다음 정보를 입력합니다.

- **Node** 를 선택하고 Extent 를 **Individual** 로 설정합니다.
- 드롭다운 목록에서 절점 번호 **939** 를 선택합니다(다른 절점 번호를 사용하는 경우 해당 번호). 이는 타워 우측 상단의 절점입니다.

- **Results entity** 로 **Displacement** 를, **Component** 로 **DX & DY** 를 선택합니다.
- **Individual items** 가 선택되어 있는지 확인합니다. 개별 절점을 처리하는 중이므로 **Sum of chosen items** 와 **Average of chosen items** 는 사용할 수 없습니다.
- **Response time history** 가 선택되어 있는지 확인합니다.
- **Peak response summary** 를 선택합니다.
- **Generate graphs in Modeller** 가 선택되어 있는지 확인하고 **Earthquake to graph** 를 1 로 지정합니다.



The image shows the 'IMDPlus Seismic Output Control' dialog box. It is divided into two main sections: 'Node/element selection' and 'Output control'.

Node/element selection:

- Node/element selection:** Radio buttons for 'Node' (selected) and 'Element'.
- Entity:** A dropdown menu set to 'Displacement'.
- Extent:** A dropdown menu set to 'Individual'.
- Component:** A dropdown menu set to 'DX & DY'.
- Node:** A dropdown menu set to '939'.
- Individual items:** A checked checkbox.
- Sum of chosen items:** An unchecked checkbox.
- Average of chosen items:** An unchecked checkbox.

Output control:

- Response time history:** A checked checkbox.
- Peak response summary:** A checked checkbox.
- Secondary response spectra (SRS):** An unchecked checkbox.
- Modal combination/factor history:** An unchecked checkbox.
- Generate graphs in Modeller:** A checked checkbox.
- Generate textfile output:** An unchecked checkbox.
- Positive/negative:** An unchecked radio button.
- Absolute:** A selected radio button.
- Envelope:** An unchecked checkbox.
- Earthquake to graph:** A dropdown menu set to '1'.

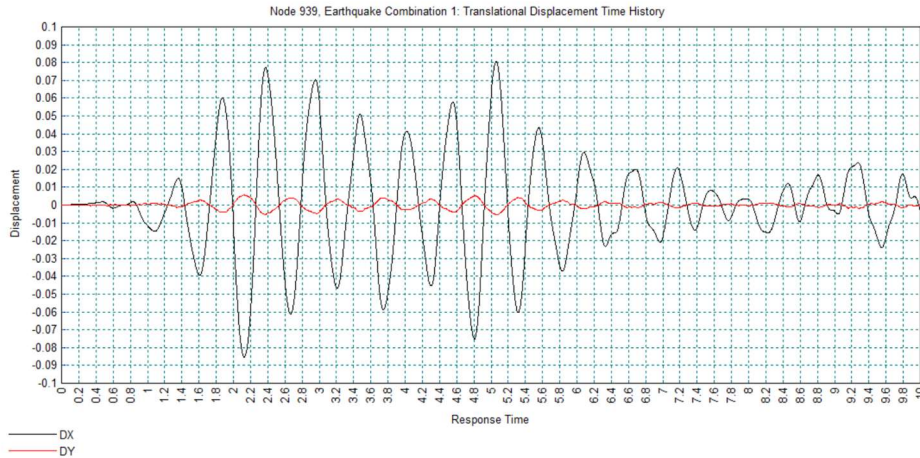
Buttons at the bottom: '< Back', 'Finish', 'Apply' (highlighted with a blue border), 'Cancel', and 'Help'.

- **Apply** 버튼을 클릭해 진행합니다.

IMDPlus 를 이용한 2 차원 프레임의 지진 응답 해석(시간 영역)

IMDPlus 해석이 실행되며, 잠시 후 1940 년 엘센트로 지진(지진 1)의 처음 10 초에 대한 타워 상단 절점의 수평(DX) 및 연직(DY) 변위가 그래프로 표시됩니다.

최대 변위는 메모장에도 출력되며, X 방향 절대 최대 변위 0.085m, Y 방향 절대 최대 변위 0.006m, 최대 회전 0.003 라디안, 절대 최대 합성 변위 0.086m(기록 1)를 나타냅니다..



```
# +-----+  
# | Record = 001 |  
# +-----+  
#
```

# Entity	Time	Value
Peak_Pos_DX	5.06000000	0.8045374385E-001
Peak_Neg_DX	2.13000000	-0.8537246350E-001
Abs_Peak_DX	2.13000000	0.8537246350E-001
Peak_Pos_DY	2.12500000	0.5614485742E-002
Peak_Neg_DY	5.07500000	-0.5391895669E-002
Abs_Peak_DY	2.12500000	0.5614485742E-002
Peak_Pos_THZ	2.13000000	0.2572498111E-002
Peak_Neg_THZ	5.06500000	-0.2500146406E-002
Abs_Peak_THZ	2.13000000	0.2572498111E-002
Abs_Peak_RSLT	2.13000000	0.8555482728E-001

```
#
```

참고. 변위는 지점을 기준으로 한 상대값입니다.

- 메모장 프로그램과 그래프 창을 닫습니다.

IMDPlus 툴바가 활성화된 경우,

- 툴바의  버튼을 클릭해 IMDPlus Output Control 대화상자를 엽니다.

활성화되어 있지 않은 경우,

Analyses> IMDPlus> Seismic...

위의 메뉴를 통해 IMDPlus Seismic Analysis Control 대화상자를 열고

Next >를 클릭해 기존 해석 제어 설정을 유지한 채 IMDPlus Output Control 대화상자를 엽니다. 전체 질량 참여율에 대한 메시지가 표시되면 **Yes** 버튼을 클릭해 계속합니다.

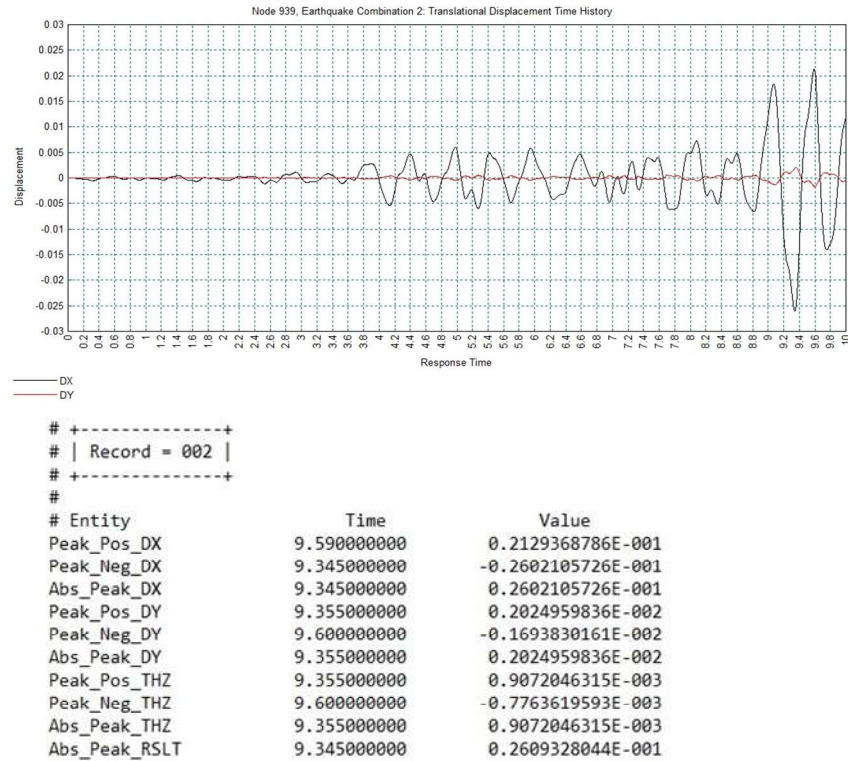
이 IMDPlus 해석에서는 두 지진 조합을 동시에 해석했습니다. 따라서 두 번째 지진에 대한 타워 상단의 변위 응답도 함께 살펴봅니다.

IMDPlus Output Control 대화상자에 다음 정보를 입력합니다.

- **Earthquake to graph** 목록 상자에서 **지진 2**를 선택합니다.
- **Apply** 버튼을 클릭해 진행합니다.

1994 년 노스리지 지진의 처음 10 초에 대한 타워 상단 절점의 수평(DX) 및 연직(DY) 변위가 그래프로 표시됩니다. 최대 변위는 메모장에도 출력되며, X 방향 절대 최대 변위 0.026m, Y 방향 절대 최대 변위 0.002m, 최대 회전 0.001 라디안, 절대 최대 합성 변위 0.026m(기록 2)를 나타냅니다.

IMDPlus 를 이용한 2 차원 프레임의 지진 응답 해석(시간 영역)



- 메모장 프로그램과 그래프 창을 닫습니다.

IMDPlus 툴바가 활성화된 경우,

- 툴바의  버튼을 클릭해 IMDPlus Output Control 대화상자를 엽니다.

활성화되어 있지 않은 경우,

Analyses> IMDPlus< Seismic...

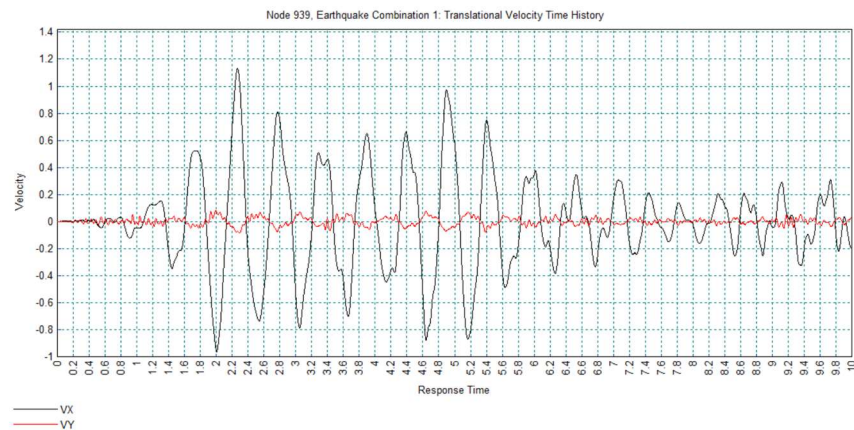
위의 메뉴를 통해 **IMDPlus Seismic Analysis Control** 대화상자를 열고 **Next >**를 클릭해 기존 해석 제어 설정을 유지한 채 IMDPlus Output Control 대화상자를 엽니다. 전체 질량 참여율에 대한 메시지가 표시되면 Yes 버튼을 클릭해 계속합니다.

속도 플롯

타워 상단의 변위 응답에 이어, 타워에 발생하는 속도도 살펴봅니다. Output Control 대화상자에 다음 정보를 입력합니다.

- **Velocity** 결과의 **VX & VY** 를 선택합니다.
- **Earthquake to graph** 목록 상자에서 **지진 1** 을 선택합니다.
- **Apply** 를 클릭해 진행합니다.

1940 년 엘센트로 지진의 처음 10 초에 대한 타워 상단의 수평(VX) 및 연직(VY) 속도가 그래프로 표시됩니다. 최대 속도는 메모장에도 출력되며, X 방향 절대 최대 속도 1.13m/s, Y 방향 절대 최대 속도 0.085m/s, 최대 회전 속도 0.039rad/s, 절대 최대 합성 속도 1.13m/s(기록 1)를 나타냅니다.



```
# +-----+
# | Record = 001 |
# +-----+
#
# Entity          Time          Value
Peak_Pos_VX       2.26500000    1.130031125
Peak_Neg_VX       2.00500000    -0.9632810127
Abs_Peak_VX       2.26500000    1.130031125
Peak_Pos_VY       1.99500000    0.8047983908E-001
Peak_Neg_VY       2.29500000    -0.8504698835E-001
Abs_Peak_VY       2.29500000    0.8504698835E-001
Peak_Pos_RVZ      2.02000000    0.3273519565E-001
Peak_Neg_RVZ      2.27000000    -0.3914713628E-001
Abs_Peak_RVZ      2.27000000    0.3914713628E-001
Abs_Peak_RSLT     2.26500000    1.132365126
#
```

IMDPlus 를 이용한 2 차원 프레임의 지진 응답 해석(시간 영역)

참고. 속도는 지점을 기준으로 한 상대값입니다.

- 메모장 프로그램과 그래프 창을 닫습니다.

IMDPlus 툴바가 활성화된 경우,

- 툴바의  버튼을 클릭해 IMDPlus Output Control 대화상자를 엽니다.

활성화되어 있지 않은 경우,

Analyses> IMDPlus> Seismic...

위의 메뉴를 통해 IMDPlus Seismic Analysis Control 대화상자를 열고 **Next >**를 클릭해 기존 해석 제어 설정을 유지한 채 IMDPlus Output Control 대화상자를 엽니다. 전체 질량 참여율에 대한 메시지가 표시되면 Yes 버튼을 클릭해 계속합니다.

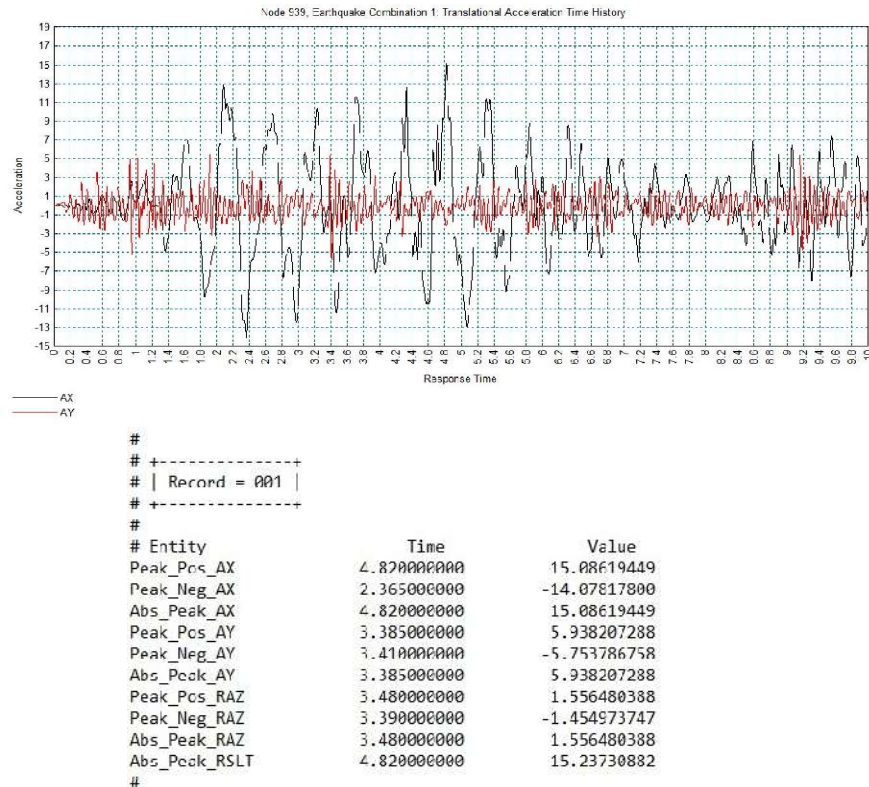
가속도 및 이차 응답 스펙트럼 플롯

이제 타워 상단의 가속도 응답을 살펴봅니다. Output Control 대화상자에 다음 정보를 입력합니다.

- **Acceleration** 결과의 **AX & AY** 를 선택합니다.
- **Secondary Response Spectra (SRS)**를 선택합니다.
- **Modify...** 버튼을 클릭해 **SRS Control** 대화상자를 엽니다.
- SRS Control 대화상자에서 **Minimum damping** 과 **Maximum damping** 을 **5.0** 으로, **Damping increment** 를 **0.0** 으로 설정합니다.
- **OK** 버튼을 클릭하고, 단일 감쇠비만 사용한다는 확인 메시지에 **Yes** 를 클릭합니다.
- **Apply** 버튼을 클릭해 진행합니다.

- IMDPlus 해석이 끝나면, 평균·최대·최소 SRS 포락선을 표시할지 묻는 메시지에 **No**를 선택합니다.

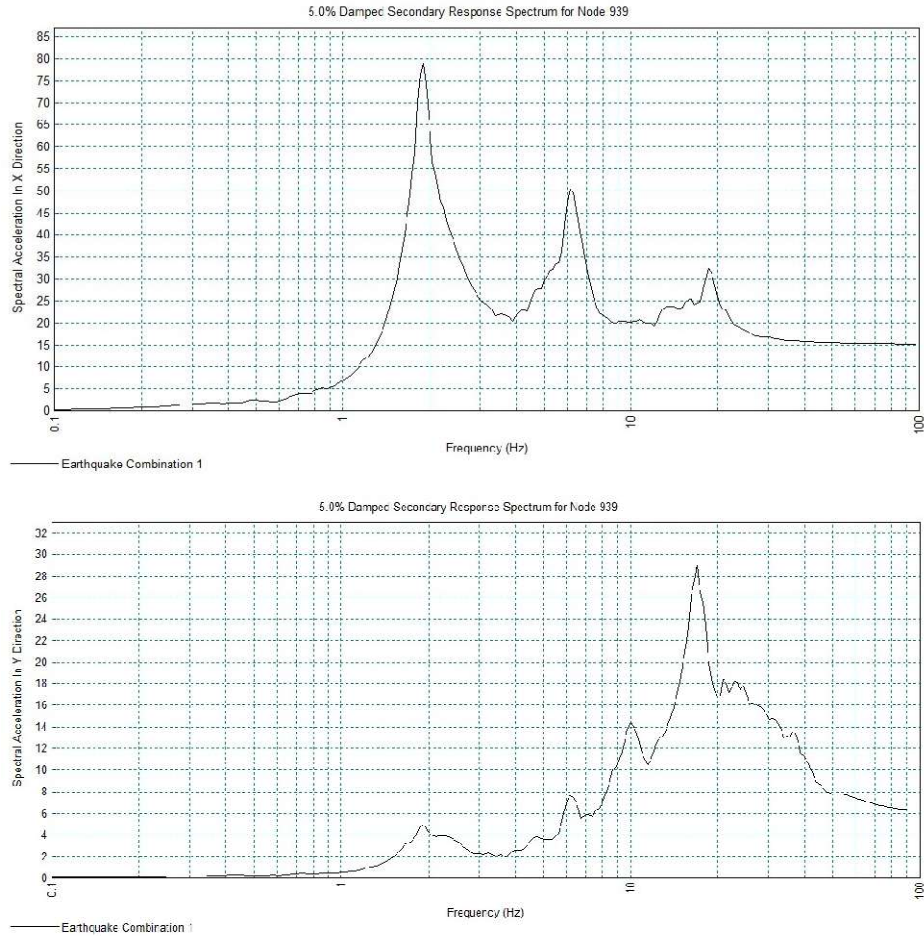
1940 년 엘센트로 지진의 처음 10 초에 대한 타워 상단의 수평(AX) 및 연직(AY) 가속도가 그래프로 표시됩니다. 최대 가속도는 메모장에도 출력되며, X 방향 절대 최대 가속도 15.086m/s^2 , Y 방향 절대 최대 가속도 5.938m/s^2 , 최대 회전 가속도 1.56rad/s^2 , 절대 최대 가속도 15.24m/s^2 (기록 1)를 나타냅니다.



이차 응답 스펙트럼도 수평·연직 방향에 대해 별도의 그래프 두 개로 생성됩니다. 이 그래프들은, 알려진 고유진동수와 감쇠를 갖는 다양한 단자유도(SDOF) 진동자를 타워 상단 절점에 부착했다고 가정했을 때 나타나는 최대 가속도

IMDPlus 를 이용한 2 차원 프레임의 지진 응답 해석(시간 영역)

응답을 나타냅니다. 참고, 생성된 그래프의 탭이 모두 보이지 않으면 Window 메뉴 항목을 이용해 그래프 창을 쉽게 선택할 수 있습니다.

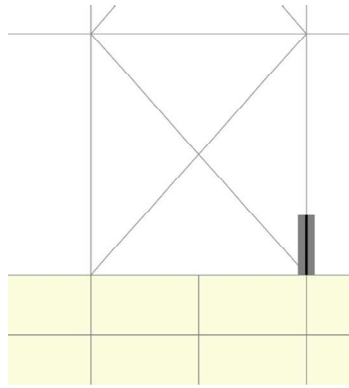


- 메모장 프로그램과 그래프 창들을 닫습니다.

개별 요소 결과 표시

앞 절에서는 타워 상단의 변위·속도·가속도 응답을 살펴보았습니다. 이제 지반면에 있는 구조물 기둥 하나의 힘과 모멘트를 살펴봅니다.

LUSAS 뷰 창에서 화면 크기를 조정해 타워 전체가 보이도록 합니다.



타워 하단을 확대해, 오른쪽에서 두 번째 기둥의 지반면 바로 위 요소를 선택합니다.

타워의 주요 부재는 라인당 4 개의 메쉬 분할로 구성되어 있으므로, 각 라인은 길이 방향으로 4 개의 요소를 갖습니다.

IMDPlus 툴바가 활성화된 경우,

- 툴바의  버튼을 클릭해 IMDPlus Output Control 대화상자를 엽니다.

활성화되어 있지 않은 경우,

Analyses> IMDPlus> Seismic...

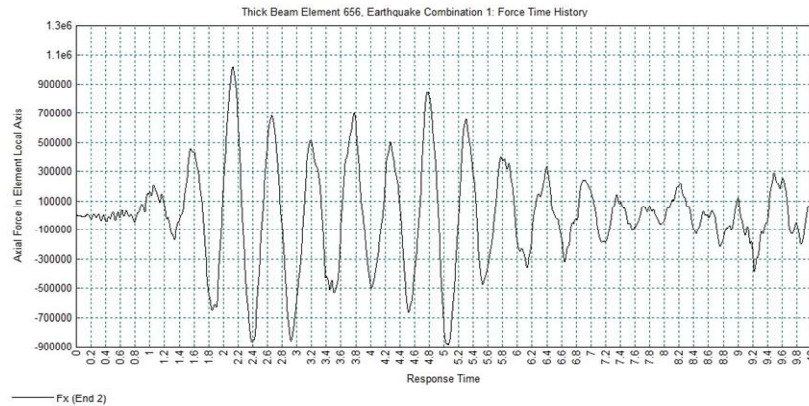
위의 메뉴를 통해 IMDPlus Seismic Analysis Control 대화상자를 열고 **Next >**를 클릭해 기존 해석 제어 설정을 유지한 채 IMDPlus Output Control 대화상자를 엽니다. 전체 질량 참여율에 대한 메시지가 표시되면 **Yes** 버튼을 클릭해 계속합니다.

- IMDPlus Output Control 대화상자에 다음 정보를 입력합니다.
- **Element**를 선택하고 Extent가 **Individual**로 선택되어 있는지 확인합니다.
- 드롭다운 목록에서 요소 번호 **656**을 선택합니다(다른 요소 번호를 사용하는 경우 해당 번호).

IMDPlus 를 이용한 2 차원 프레임의 지진 응답 해석(시간 영역)

- 지반면에 해당하는 **End 2** 를 선택합니다. (라인의 방향을 확인하면 어느 쪽이 End 1 이고 어느 쪽이 End 2 인지 알 수 있습니다.)
- **Force/Moment - Thick 2D Beam** 결과의 **Fx** 를 선택합니다.
- **Individual items** 가 계속 선택되어 있는지 확인합니다. 개별 요소를 처리하는 중이므로 '**Sum of chosen items**'와 '**Average of chosen items**'는 사용할 수 없습니다. **Peak response summary** 를 선택 해제합니다.
- **Apply** 버튼을 클릭해 진행합니다.

1940 년 엘센트로 지진의 처음 10 초에 대한 기둥의 축력(N) 시간이력이 그래프로 표시됩니다. Output Control 대화상자에서 **Fy(N)**와 **Mz(Nm)**를 선택하면 전단력 및 휨모멘트에 대해서도 유사한 그래프를 생성할 수 있습니다.



- 그래프 창을 닫습니다.

IMDPlus 툴바가 활성화된 경우,

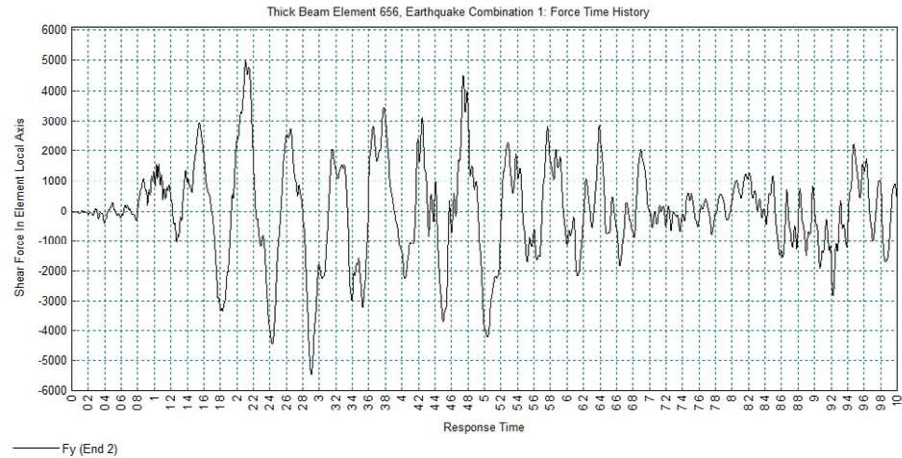
- 툴바의  버튼을 클릭해 IMDPlus Output Control 대화상자를 엽니다.

활성화되어 있지 않은 경우,

Analyses> IMDPlus< Seismic...

위의 메뉴를 통해 IMDPlus Seismic Analysis Control 대화상자를 열고 **Next** > 를 클릭해 기존 해석 제어 설정을 유지한 채 IMDPlus Output Control 대화상자를 엽니다. 전체 질량 참여율에 대한 메시지가 표시되면 **Yes** 버튼을 클릭해 계속합니다.

- **Force/Moment - Thick 2D Beam** 결과의 **Fy** 를 선택합니다. **Apply** 버튼을 클릭해 진행합니다.



- 그래프 창을 닫습니다.

IMDPlus 툴바가 활성화된 경우,

- 툴바의  버튼을 클릭해 IMDPlus Output Control 대화상자를 엽니다.

활성화되어 있지 않은 경우,

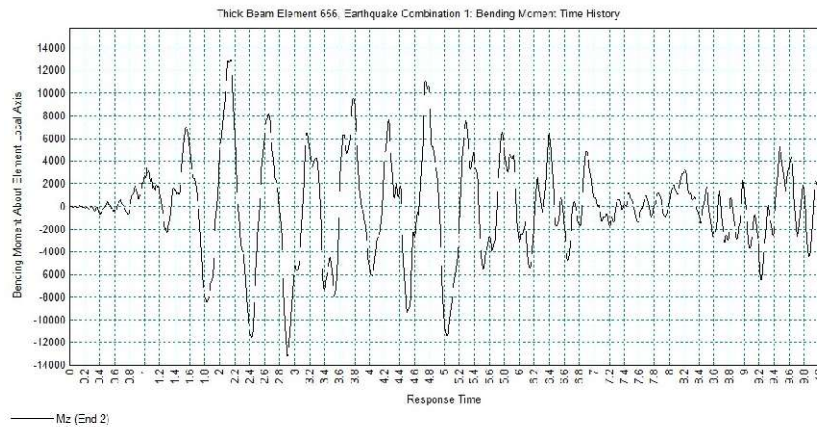
Analyses> IMDPlus< Seismic...

위의 메뉴를 통해 IMDPlus Seismic Analysis Control 대화상자를 열고 **Next** > 를 클릭해 기존 해석 제어 설정을 유지한 채 IMDPlus Output

IMDPlus 를 이용한 2 차원 프레임의 지진 응답 해석(시간 영역)

Control 대화상자를 엽니다. 전체 질량 참여율에 대한 메시지가 표시되면 Yes 버튼을 클릭해 계속합니다.

- **Force/Moment - Thick 2D Beam** 결과의 **Mz** 를 선택합니다.
- **Finish** 버튼을 클릭해 개별 요소 결과의 출력 처리를 마칩니다.
- IMDPlus 가 생성한 임시 파일을 삭제하여 디스크 공간을 확보할지 묻는 메시지가 표시되면 **Yes** 를 클릭합니다.



- 그래프 창을 닫습니다.

선택한 요소 집합의 결과 표시

앞 절에서 살펴본 예제 해석은 모두 구조물의 개별 절점이나 요소를 이용했습니다. 이 절에서는 보 요소 집합을 선택하여 해석함으로써, 타워의 모든 기둥 하단에서의 평균 힘/모멘트와 최대 힘/모멘트를 살펴봅니다.

LUSAS 뷰 창에서 화면 크기를 조정해 타워 전체가 보이도록 합니다.

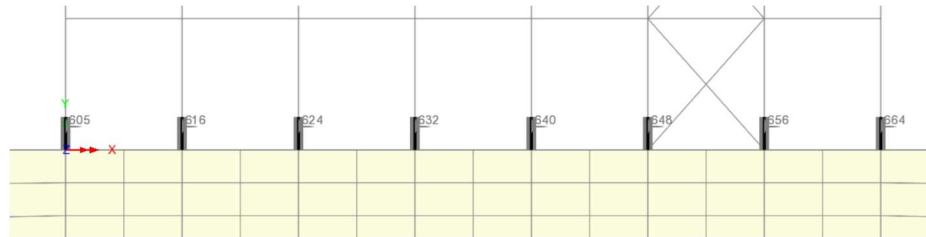
- 아무 항목도 선택하지 않은 상태에서 뷰 창의 빈 곳을 마우스 오른쪽 버튼으로 클릭하고 **Labels** 옵션을 선택해 **Treeview> Layer** 탭에 **Labels** 레이어를 추가합니다.

- Properties 대화상자에서 **Element / Name** 체크박스와 **Label selected items only** 체크박스를 선택합니다.
- **Advanced...** 버튼을 클릭하고, label properties 대화상자에서 **Font...** 버튼을 클릭해 Font: **Arial**, Font style: **Bold**, Size: **20**을 선택한 뒤 **OK**를 클릭합니다.
- **OK**를 클릭해 이전 대화상자로 돌아간 뒤, 다시 **OK**를 클릭해 뷰 창으로 돌아갑니다.

프레임 하단을 확대해, 구조물의 모든 기둥에서 지반면 바로 위의 보 요소를 다음 그림과 같이 선택합니다(요소 번호는 그림과 다를 수 있습니다).

참고. 모델에서 여러 요소를 선택하려면 **Shift** 또는 **Ctrl** 키를 사용합니다.

참고. IMDPlus 요소 집합에는 썩 보 요소, 연속체(continuum) 요소, 썩 셸 요소와 같이 동일한 유형의 요소만 사용할 수 있습니다. 다만 요소 집합에는 가우스 포인트나 절점 수가 서로 다른 요소가 포함될 수 있습니다.



IMDPlus 툴바가 활성화된 경우,

툴바의  버튼을 클릭해 IMDPlus Output Control 대화상자를 엽니다.

활성화되어 있지 않은 경우,

Analyses> IMDPlus< Seismic...

- 위의 메뉴를 통해 IMDPlus Seismic Analysis Control 대화상자를 열고 **Next >**를 클릭해 기존 해석 제어 설정을 유지한 채 IMDPlus Output Control

IMDPlus 를 이용한 2 차원 프레임의 지진 응답 해석(시간 영역)

대화상자를 엽니다. 전체 질량 참여율에 대한 메시지가 표시되면 **Yes** 버튼을 클릭해 계속 합니다.

- IMDPlus Output Control 대화상자에 다음 정보를 입력합니다.
- 드롭다운 목록에서 **Element** 를 선택하고 Extent 를 Selected 로 변경합니다. 이렇게 하면 앞 단계에서 선택한 프레임 하단의 보 요소 8 개가 처리 대상으로 지정됩니다.

참고. Extent 가 **Selected** 로 설정되어 있으므로 Element 와 End 드롭다운 목록은 선택할 수 없습니다. 또한 여러 요소를 하나의 해석에서 함께 처리하므로 요소의 End 는 자동으로 All 로 설정됩니다.

- Results entity 로 **Force/Moment – Thick 2D Beam** 을, Component 로 **Fx** 를 선택합니다.
- 8개 보 요소의 평균 결과를 살펴볼 것이므로 **Individual items** 를 선택 해제하고 **Average of chosen items** 를 선택합니다.
- **Response time history** 가 선택되어 있는지 확인합니다.
- **Peak response summary** 를 선택하고 **Envelope** 를 선택합니다.
- **Generate graphs in Modeller** 가 선택되어 있고 **Earthquake to graph** 가 1 로 설정되어 있는지 확인합니다.

대화상자는 다음과 같은 모습이어야 합니다.

IMDPlus Seismic Output Control

Node/element selection

☐ Node ☒ Element Entity: Force/Moment - Thick 2D Beam

Extent: Selected Component: Fx

Element: 656

End: All

☐ Individual items
☐ Sum of chosen items
☒ Average of chosen items

Output control

☒ Response time history

☒ Peak response summary ☐ Positive/negative ☒ Envelope
☒ Absolute

☒ Secondary response spectra (SRS) Modify...

☐ Modal combination/factor history Options...

☒ Generate graphs in Modeller Earthquake to graph: 1

☐ Generate textfile output Options...

< Back Finish Apply Cancel Help

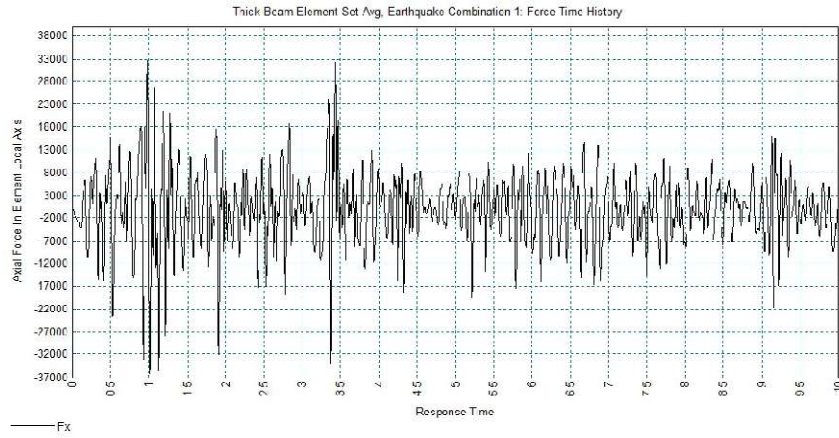
- Apply 버튼을 클릭해 진행합니다. 선택한 요소를 모두 처리할지 묻는 메시지가 표시되면 Yes 를 클릭합니다.

참고. IMDPlus 해석에서는 **Individual items**, **Sum of chosen items**, **Average of chosen items** 옵션을 어떤 조합으로도 사용할 수 있습니다. 다만 **Extent** 가 **Selected** 또는 **All**(절점 또는 요소)로 설정된 상태에서 Individual items 옵션을 사용하면, 처리 대상으로 선택한 절점 또는 요소 수에 따라 매우 많은 수의 그래프가 생성될 수 있습니다.

참고. **Average of chosen items** 는 먼저 선택한 요소의 보 단부 16 개에 대한 결과를 합산한 뒤, 이 합산 결과를 단순 평균하여 요소 평균 축력 시간이력을 구하고, 여기서 평균 최대값 결과를 얻습니다.

IMDPlus 를 이용한 2 차원 프레임의 지진 응답 해석(시간 영역)

IMDPlus 해석이 실행되며, 잠시 후 1940 년 엘센트로 지진(지진 1)의 처음 10 초에 대해 선택한 보 요소들의 평균 축력(Fx)을 나타내는 그래프가 표시됩니다. 보 요소의 평균 축력은 다음 그림과 같습니다.



요소 평균 힘·모멘트에 대한 최대 결과는 메모장의 peak_forceSet_Avg1.sum 파일에 표시됩니다. 다음 그림과 같이, 1940 년 엘센트로 지진(기록 1)에 대해 해석 시간 0.98 초에서 최대 양의 평균 축력(Fx) 32.7kN 이, 1.01 초에서 최대 음의 평균 축력(Fx) -36.1kN 이 발생함을 나타냅니다.

```
#
# +-----+
# | Record = 001 |
# +-----+
#
# Entity          Time          Value
Peak_Pos_Fx       0.980000000    32662.97094
Peak_Neg_Fx       1.010000000   -36061.73531
Abs_Peak_Fx       1.010000000    36061.73531
Peak_Pos_Fy       2.105000000    5585.27762
Peak_Neg_Fy       2.905000000   -5997.230748
Abs_Peak_Fy       2.905000000    5997.230748
Peak_Pos_Mz       2.145000000    8359.770379
Peak_Neg_Mz       2.905000000   -8270.308111
Abs_Peak_Mz       2.145000000    8359.770379
#
```

선택한 보 요소들의 최대 결과 포락선은 메모장의 **peak_forceSet1.sum** 파일에 표시됩니다. 1940 년 엘센트로 지진(기록 1)에 대한 결과는 다음 그림과 같습니다. 최대 양의 축력(Fx) 1019.1kN 은 요소 656 의 End 1 에서 시간 2.13 초에 발생하며,

최대 음의 축력(Fx) -956.0kN 은 요소 648 의 End 1 에서 시간 2.135 초에 발생합니다.

참고. IMDPlus 에서 최대 결과의 포락선은 선택한 보 요소들의 16 개 단부 전체에 대한 개별 결과를 검토하여 얻습니다. 이를 통해 선택한 요소 집합에서 최대 결과가 발생하는 위치를 빠르게 확인할 수 있습니다.

```
# +-----+
# | Record = 001 |
# +-----+
#
# Entity          Time          Value          Element      End
Peak_Pos_Fx       2.130000000      1019100.741      656          1
Peak_Neg_Fx       2.140000000      -955980.4941     648          1
Abs_Peak_Fx       2.130000000      1019100.741      656          1
Peak_Pos_Fy       2.105000000      6683.413400     640          1
Peak_Neg_Fy       2.905000000      -6982.349537     640          1
Abs_Peak_Fy       2.905000000      6982.349537     640          1
Peak_Pos_Mz       2.145000000      15468.26268     640          2
Peak_Neg_Mz       2.905000000      -15549.31100     640          2
Abs_Peak_Mz       2.905000000      15549.31100     640          2
#
```

- 메모장 프로그램들과 그래프 창을 닫습니다.

IMDPlus 툴바가 활성화된 경우,

- 툴바의  버튼을 클릭해 IMDPlus Output Control 대화상자를 엽니다.

활성화되어 있지 않은 경우,

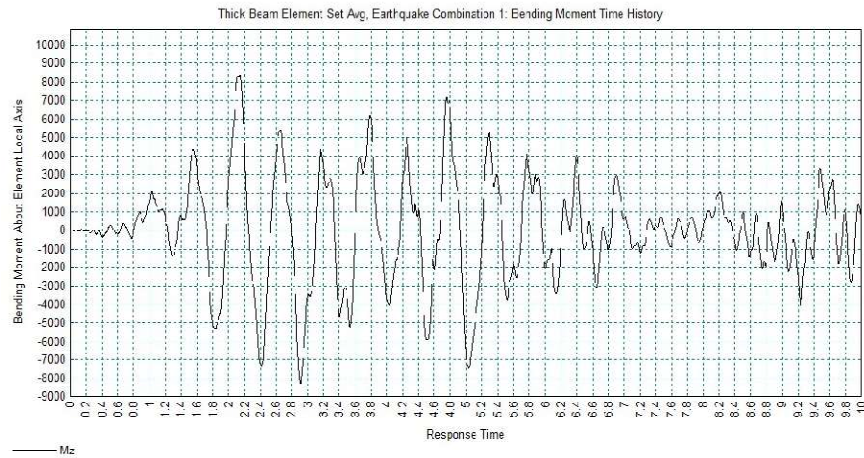
Analyses> IMDPlus< Seismic...

- 위의 메뉴를 통해 IMDPlus Seismic Analysis Control 대화상자를 열고 **Next** > 를 클릭해 기존 해석 제어 설정을 유지한 채 IMDPlus Output Control 대화상자를 엽니다. 전체 질량 참여율에 대한 메시지가 표시되면 **Yes** 버튼을 클릭해 계속 합니다.
- Force/Moment - Thick 2D Beam 결과의 **Mz** 를 선택합니다.
- Finish 버튼을 클릭해 요소 결과의 출력 처리를 마칩니다. 선택한 요소를 모두 처리할지 묻는 메시지가 표시되면 Yes 를 클릭합니다.

IMDPlus 를 이용한 2 차원 프레임의 지진 응답 해석(시간 영역)

- IMDPlus 가 생성한 임시 파일을 삭제하여 디스크 공간을 확보할지 묻는 메시지가 표시되면 Yes 를 클릭합니다.

선택한 요소들로부터 얻은 평균 모멘트(Mz) 그래프가 다음 그림과 같이 표시됩니다.



메모장에 표시되는 최대 평균 결과 파일들은 앞서 축력(Fx)을 해석했을 때와 동일합니다. 이는 시간 2.145 초(기록 1)에서 절대 최대 평균 모멘트(Mz) 8.4kNm 가 발생함을 나타냅니다. 최대 결과 포락선은 요소 640 의 End 2 에서 시간 2.905 초(기록 1)에 절대 최대 모멘트(Mz) 15.6kNm 가 발생함을 나타냅니다.

```
#
# +-----+
# | Record = 001 |
# +-----+
#
```

# Entity	Time	Value	Element	End
Peak_Pos_Fx	2.13000000	1019065.992	656	1
Peak_Neg_Fx	2.13500000	-955968.1967	648	1
Abs_Peak_Fx	2.13000000	1019065.992	656	1
Peak_Pos_Fy	2.10500000	6684.561933	640	1
Peak_Neg_Fy	2.90500000	-6985.730242	640	1
Abs_Peak_Fy	2.90500000	6985.730242	640	1
Peak_Pos_Mz	2.14500000	15472.76581	640	2
Peak_Neg_Mz	2.90500000	-15552.26808	640	2
Abs_Peak_Mz	2.90500000	15552.26808	640	2

```
#
```

메모장 프로그램들과 그래프 창을 닫습니다.

모델 저장

모델을 저장합니다. 이렇게 하면 결과 처리 과정에서 정의한 모든 하중 조합이 저장됩니다.

File> Save...

이것으로 예제를 마칩니다.