

IMDPlus를 이용한 열차 주행에 따른 교량의 진동 응답 해석

LUSAS 버전:	23.0
소프트웨어 제품:	모든 Plus 버전
제품 옵션:	IMDPlus
참고: 이 예제는 LUSAS Teaching and Training Version으로는 사용할 수 없습니다.	

개요

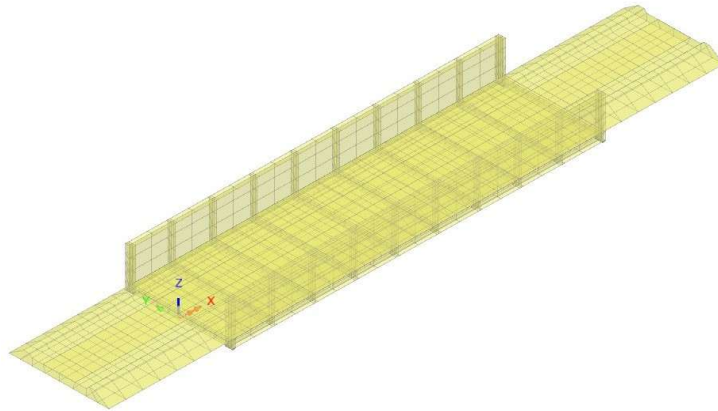
이 예제에서는 열차가 통과할 때 강재 철도 교량의 응답을 살펴봅니다.

단위는 N, m, kg, s, C를 사용합니다.

해석 목표

이 해석의 검토 내용은 다음과 같습니다.

- 열차 속도 15m/s에서의 X, Y, Z 방향 처짐
- 열차 속도 70m/s에서의 연직 방향 가속도
- 15m/s에서 70m/s까지 5m/s 간격의 속도 범위에 대한 연직 방향 최대 처짐 및 가속도
- 주형 복부(web)의 단면력 및 최대 단면력
- 교량 구조물 전체 절점의 평균 및 최대 연직 변위와 합성 동적증폭계수
- 교량 구조물의 모든 지점 절점에 대한 합산 반력 및 최대 반력
- 교량 구조물 측면 패널의 평균 및 최대 응력



키워드

3D, Moving Load, Time Domain, Response, Interactive, Modal, Dynamics, IMD, IMDPlus, Eigenvalue.

관련 파일

관련 파일은 LUSAS 웹사이트에서 다운로드할 수 있습니다.

- **IMDPlus_rail_bridge.lvb**는 구조물 모델을 생성하는 스크립트입니다.
- **ec1-2 Type3.lmd**는 이 예제에서 사용하는 유로코드 **EN 1991-2:2023 Type 3** 열차의 이동하중 정의를 담은 속성 라이브러리입니다.
- **ec1-2 Type3.xlsx**는 유로코드 **EN 1991-2:2023 Type 3** 열차의 축 위치와 하중이 담긴 엑셀 스프레드시트입니다.

모델링

LUSAS 모델러 실행

LUSAS 모델러 실행 방법에 대한 자세한 내용은 Examples Manual Introduction 문서의 Running LUSAS Modeller 항목을 참고하세요.

모델 만들기

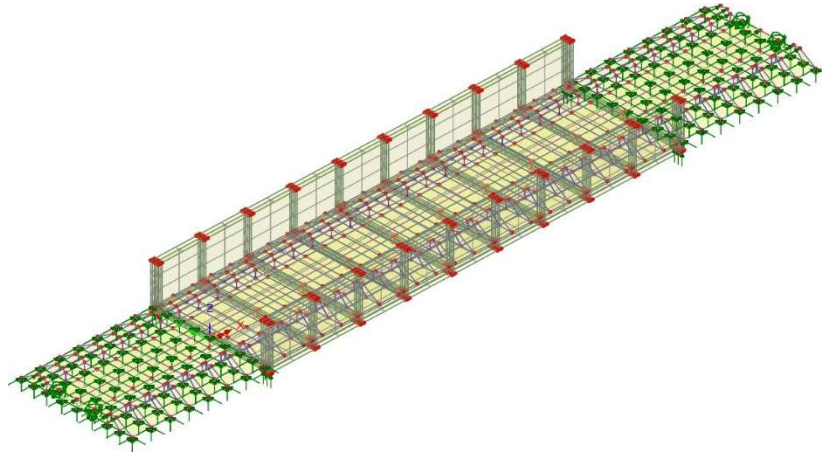
File > New...

- 파일 이름을 **IMDPlus_rail_bridge.mdl**로 입력합니다.
- 기본값인 User-defined 작업 폴더를 사용합니다.
- **Analysis type**이 **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... 

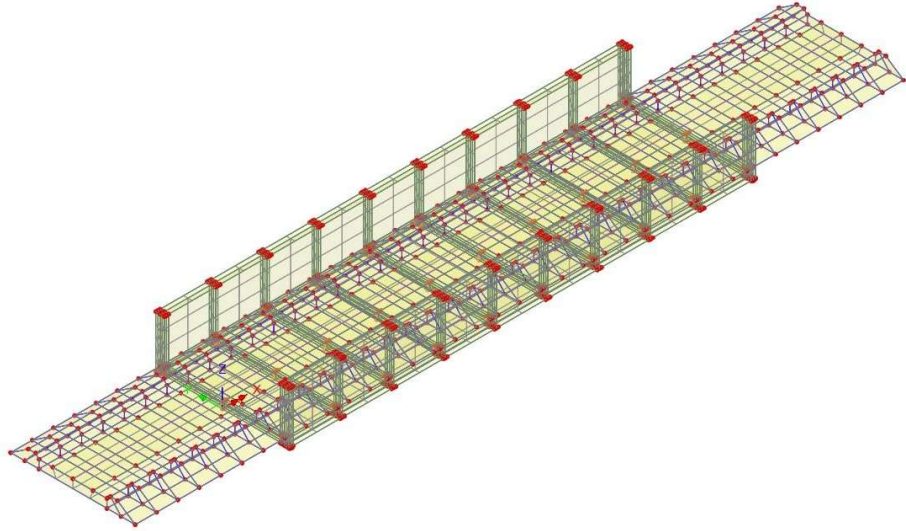
- 모델을 만들려면, 다운로드한 파일
IMDPlus_rail_bridge.lvb를 엽니다.



파일을 열면 잠시 후 다음과 같은 교량 모델 화면이 표시됩니다.

File > Save As...

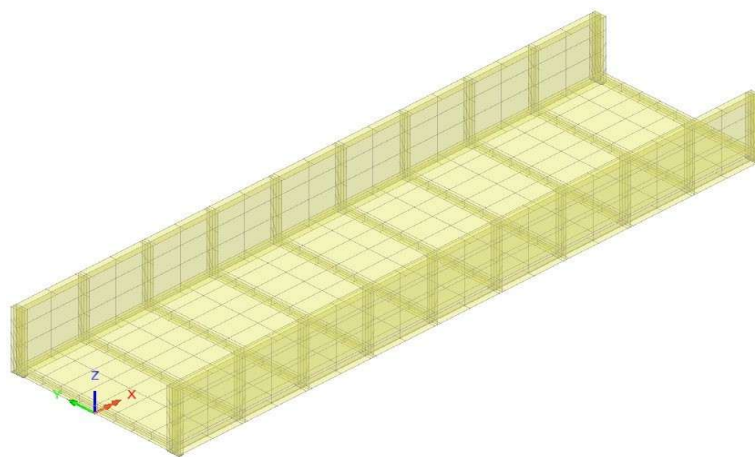
- **IMDPlus_rail_bridge**라는 새 프로젝트 폴더를 만들고 모델을 이 폴더에 저장합니다. 이렇게 하면 IMDPlus가 생성하는 관련 파일들을 다른 해석과 분리해 관리할 수 있습니다.
- **Treeview>Layer**  탭에서 **Attributes** 레이어의 표시를 끕니다.



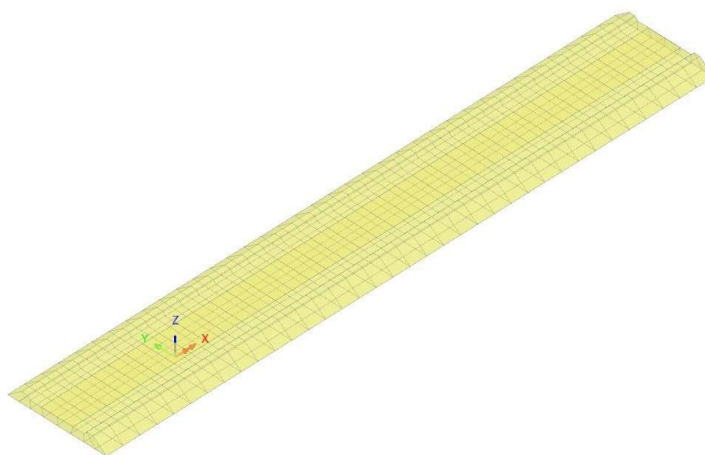
참고. 이 해석에서는 결과 처리 과정에서 동적 하중만 고려하며 이는 이후에 정의하므로, 정적 구조 하중은 필요하지 않습니다.

모델링 개요

이 교량은 길이 약 16.5m, 폭 약 4.75m이며, 자갈 도상과 콘크리트 침목을 갖춘 단선 궤도를 지지합니다. 주 구조물은 강재로 만들어져 있으며 셸 요소로 모델링합니다. 이 해석에서는 자갈 도상을 3차원 솔리드로 완전히 표현하고, 도상 위에 Thick Beam 요소로 침목을 모델링하여 도상-궤도-교량 상호작용을 구현했습니다. 궤도의 레일은 침목 사이를 잇는 Thick Beam 요소로 모델링했으며, 도상-궤도 전체 모델은 슬라이딩 전용 Slideline으로 교량 상판에 연결됩니다. 이 예제에서는 교량과 도상 모델에 성긴 메쉬를 적용했으므로, 더 조밀한 메쉬를 사용했을 때보다 해석 결과의 정확도가 낮습니다. 실제 구조물을 해석할 때는 교량의 진동 모드와 교량 위 하중 이동을 더 정확히 반영할 수 있도록 더 조밀한 메쉬를 사용하는 것을 권장합니다.

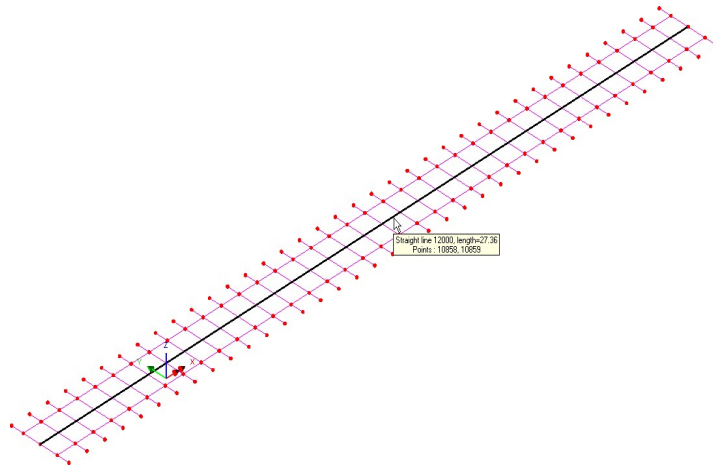


교량



도상

레일에 작용하는 디스크리트 포인트하중을 3차원 솔리드 요소로 분산시키기 위해, 궤도 모델링에는 레일을 나타내는 보 요소 사이를 잇는 강성과 질량이 매우 작은 셸 요소를 사용합니다. 궤도 표현은 다음 그림과 같습니다.



궤도(침목·레일)

궤도 중앙을 따라 지나는 라인(Line 12000)은 교량 위 열차의 이동 경로를 정의하는 데 사용되며, 이 예제에서 이후에도 사용됩니다. 강성·질량이 매우 작은 쉘 요소에 바람직하지 않은 동적 거동이 발생하지 않도록, 두 레일 사이는 분할을 하나만 두어 모델에 강성을 추가하지 않으면서도 쉘을 완전히 지지하도록 했습니다.

고유값 컨트롤 정의하기

고유값 컨트롤은 하중 케이스의 속성으로 정의됩니다.

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

Eigenvalue 대화상자가 나타나면 매개변수를 지정합니다.

- **Eigenvalues required**를 **Range**로 설정합니다.
- **Range**가 **Frequency**로 설정되어 있는지 확인합니다.
- **Minimum frequency**를 **0**으로 설정합니다.

IMDPlus를 이용한 열차 주행에 따른 교량의 진동 응답 해석

- **Maximum frequency**를 35로 설정합니다.
- **Number of eigenvalues**를 0으로 설정합니다(이 범위 내 모든 주파수를 구합니다).
- **Type of eigensolver**가 **Default**로 설정되어 있는지 확인합니다.

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

- OK 버튼을 클릭해 마칩니다.

File > Save 

모델 파일을 저장합니다.

해석 실행

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

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

결과 검토

해석을 LUSAS 모델러 내에서 실행하면, 결과는 현재 모델 위에 로드되며 각 고유값에 대한 하중 케이스 결과는 **Treeview> Analyses** 탭에서 확인할 수 있습니다. Eigenvalue 1이 기본적으로 활성화되어 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 약 90%가 반영되었는지 확인해야 합니다. 90% 미만이라도, 누락된 진동 모드가 동적 입력에 의해 가진되지 않거나 구조물의 상당 부분이 해당 방향으로 지점에 구속되어 그 모드에 참여할 수 없는 경우에 한해서는 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 1에 대해 available results 패널에서 **Sum mass participation factors**를 선택하고 OK를 클릭합니다. 결과가 표시되며, **Treeview> Utilities** 탭에 **Print Results Wizard** 항목이 추가됩니다.

IMDPlus를 이용한 열차 주행에 따른 교량의 진동 응답 해석

LUSAS View: IMDPlus_rail_bridge.mdl Window 1 Sum mass participation factors x

	Mode ▲	Sum Mass X	Sum Mass Y	Sum Mass Z	Frequency	Period
1	1	0.0111762	16.5213E-6	0.70681	6.35097	0.157456
2	2	0.012301	17.5145E-6	0.706921	9.78044	0.102245
3	3	0.0126563	0.201211	0.707195	11.9579	0.0836264
4	4	0.0133135	0.201221	0.76798	12.576	0.0795166
5	5	0.0351538	0.825051	0.769658	16.2725	0.0614534
6	6	0.0358118	0.849593	0.769926	16.4299	0.0608646
7	7	0.183829	0.898386	0.80477	17.0919	0.0585073
8	8	0.184235	0.90008	0.830182	19.4189	0.0514961
9	9	0.218193	0.901224	0.831635	23.9345	0.0417807
10	10	0.250231	0.901341	0.833605	24.0917	0.0415081
11	11	0.880527	0.90147	0.861113	24.5365	0.0407556
12	12	0.903429	0.943281	0.8619	25.3362	0.0394692
13	13	0.924662	0.943478	0.862841	28.139	0.0355379
14	14	0.924694	0.944287	0.862844	28.284	0.0353557
15	15	0.924762	0.944475	0.880501	28.9023	0.0345994
16	16	0.940955	0.944483	0.881134	32.3357	0.0309256
17	17	0.940957	0.944753	0.881134	33.6284	0.0297367
18	18	0.940989	0.944761	0.881135	34.584	0.0289151
19	19	0.941005	0.944847	0.881135	34.9625	0.0286021

확인해 보면 이 해석에서는 모든 방향에서 90%에 근접한 값을 달성했음을 알 수 있습니다.

참고. 이 해석에서는 35Hz 이하 주파수를 갖는 진동 모드만 포함하며, 이보다 높은 주파수는 해석에 중요하지 않다고 간주합니다. 이 해석에서(모드 19 기준) X 방향으로 전체 질량의 94%, Y 방향으로 94%, Z 방향으로 88%가 반영됨을 확인할 수 있습니다.

- 결과 창을 닫습니다.
- 결과 유형으로 **Eigenvalues**를 선택합니다. Loadcase 1에 대해 available results 패널에서 **Sum mass participation factors**를 선택 해제하고 **Mass participation factors**를 선택한 뒤 OK를 클릭합니다.

Utilities > Print Results Wizard...

결과가 표시되며, Treeview> Utilities 🔑 탭에 Print Results Wizard 항목이 추가됩니다.

LUSAS View: IMDPlus_rail_bridge.mdl Window 1 Mass participation factors

	Mode ▲	Mass PF X	Mass PF Y	Mass PF Z	Frequency	Period
1	1	0.0111762	16.5213E-6	0.70681	6.35097	0.157456
2	2	1.12477E-3	0.993205E-6	0.11053E-3	9.78044	0.102245
3	3	0.355329E-3	0.201194	0.274654E-3	11.9579	0.0836264
4	4	0.657132E-3	9.54664E-6	0.0607852	12.576	0.0795166
5	5	0.0218404	0.62383	1.67767E-3	16.2725	0.0614534
6	6	0.657934E-3	0.0245415	0.267876E-3	16.4299	0.0608646
7	7	0.148018	0.0487933	0.0348435	17.0919	0.0585073
8	8	0.40572E-3	1.69459E-3	0.0254123	19.4189	0.0514961
9	9	0.0339575	1.14388E-3	1.45348E-3	23.9345	0.0417807
10	10	0.0320381	0.116338E-3	1.96941E-3	24.0917	0.0415081
11	11	0.630296	0.129627E-3	0.0275085	24.5365	0.0407556
12	12	0.0229019	0.0418103	0.786394E-3	25.3362	0.0394692
13	13	0.0212328	0.197928E-3	0.941292E-3	28.139	0.0355379
14	14	32.042E-6	0.808706E-3	2.90818E-6	28.284	0.0353557
15	15	68.0917E-6	0.187872E-3	0.0176574	28.9023	0.0345994
16	16	0.0161925	7.93875E-6	0.633004E-3	32.3357	0.0309256
17	17	2.5144E-6	0.270408E-3	0.322803E-6	33.6284	0.0297367
18	18	31.9051E-6	7.18089E-6	0.193415E-6	34.584	0.0289151
19	19	15.885E-6	86.5752E-6	13.7149E-9	34.9625	0.0286021

이 질량 참여 계수로부터 교량의 주요 진동 모드가 Z 방향(연직)은 모드 1, Y 방향(횡방향)은 모드 5, X 방향(종방향)은 모드 11임을 확인할 수 있습니다.

- 결과 창을 닫습니다.

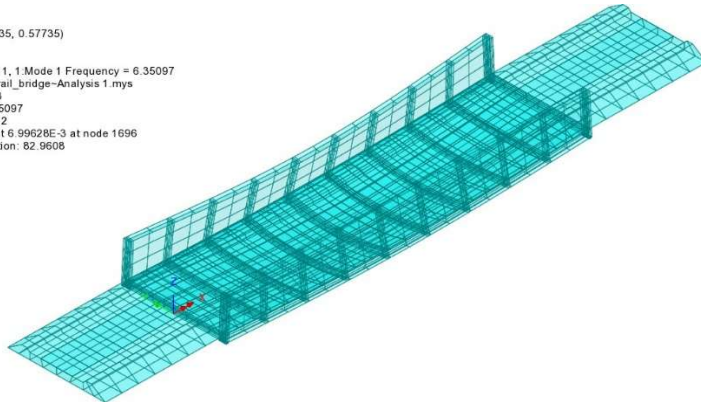
모드 형상 표시

- Treeview > Layer  탭에서 **Mesh, Geometry** 레이어의 표시를 끕니다.
- 아무 항목도 선택하지 않은 상태에서 그래픽 윈도우의 빈 곳을 마우스 오른쪽 버튼으로 클릭하고 **Deformed mesh** 옵션을 선택해 Treeview에 레이어를 추가합니다. OK 버튼을 클릭해 기본값을 적용하면 Eigenvalue 1의 변형 메쉬가 표시됩니다.
- 지점이 표시되어 있다면 **Supports on/off**  버튼을 클릭해 화면에서 지점 표시를 제거합니다.
- Treeview 하단 패널에서 **Window summary** 옵션을 선택하고 **Details...** 버튼을 클릭합니다. Window summary properties 대화상자에서 위치를 (15.0, -15.0)으로 설정하고 OK 버튼을 클릭해 뷰 창으로 돌아갑니다.

IMDPlus를 이용한 열차 주행에 따른 교량의 진동 응답 해석

이 진동 모드는 앞서 '질량 참여 계수 확인하기'에서 확인한 것처럼 연직 방향의 주요 모드입니다.

Scale: 1: 96.7361
Zoom: 100.0
Eye: (-0.57735, -0.57735, 0.57735)
Eigenvalue analysis
Analysis: Analysis 1
Loadcase: 1 Loadcase 1, 1 Mode 1 Frequency = 6.35097
Results file: IMDPlus_rail_bridge-Analysis 1.mys
Eigenvalue: 1.59235E3
Natural frequency: 6.35097
Error norm: 25.0127E-12
Maximum displacement 6.99628E-3 at node 1696
Deformation exaggeration: 82.9608



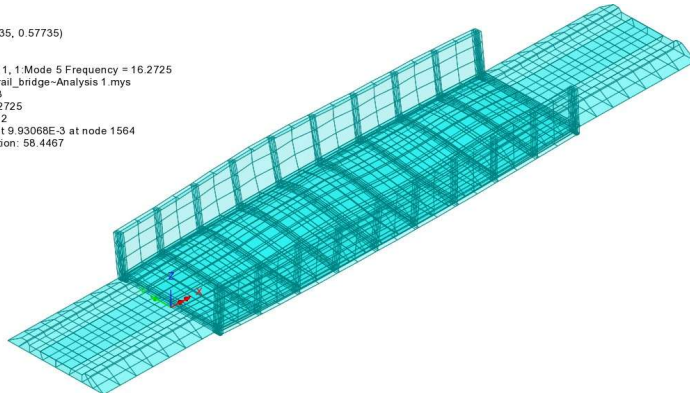
각 고유값을 활성화하면 모든 모드 형상에 대한 변형 메쉬를 확인할 수 있습니다.

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

- **Treeview > Analyses**  탭에서 **Mode 5 Frequency = 16.2725** 항목을 마우스 오른쪽 버튼으로 클릭하고 **Set Active** 옵션을 선택합니다. 이 고유모드에 대한 모드 형상이 표시됩니다.

이 진동 모드는 앞서 '질량 참여 계수 확인'에서 확인한 것처럼 교량 전체에서 횡방향(Y) 참여 질량이 가장 큰 모드입니다.

Scale: 1: 96.7359
Zoom: 100.0
Eye: (-0.57735, -0.57735, 0.57735)
Eigenvalue analysis
Analysis: Analysis 1
Loadcase: 1 Loadcase 1, 1 Mode 5 Frequency = 16.2725
Results file: IMDPlus_rail_bridge-Analysis 1.mys
Eigenvalue: 10.4537E3
Natural frequency: 16.2725
Error norm: 6.29919E-12
Maximum displacement 9.93068E-3 at node 1564
Deformation exaggeration: 58.4467



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.

관심 절점·요소 선택

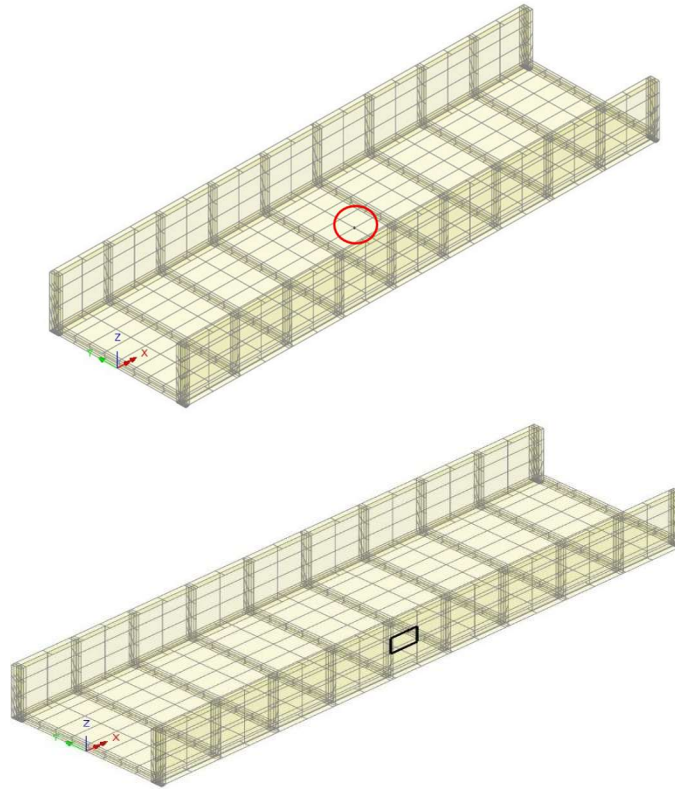
IMDPlus 해석을 실행하기 전에, 검토할 구조물 위치의 절점·요소 번호를 파악해 두어야 합니다. 이는 커서로 관심 위치를 선택하고 해당 절점·요소 번호를 확인하는 방식으로 할 수 있습니다.

- **Treeview> Layer** 탭에서 **Deformed mesh, Annotation** 레이어의 표시를 끕니다.
- **Treeview> Layer** 탭에서 **Mesh** 레이어 이름을 더블클릭하고 OK 버튼을 클릭해 기본값을 적용합니다. 이렇게 하면 레이어가 켜집니다.

도상과 궤도를 제외하고 교량 구조물만 보려면 다음과 같이 합니다.

- **Treeview> Group** 탭에서 **Bridge_Structure** 그룹 이름을 마우스 오른쪽 버튼으로 클릭하고 드롭다운 메뉴에서 **Set as Only Visible** 옵션을 선택합니다.

표시된 절점·요소를 선택하거나 그 위로 커서를 이동하면 관심 절점·요소 번호를 확인할 수 있습니다. 이 해석의 첫 단계에서는 다음 그림과 같이 교량 상판 중앙의 절점(**node 1696**)과 측면 주형 중앙의 요소(**element 1209**)를 다룹니다.



유로코드 EN 1991-2:2023 Type 3 열차 편성 정의

해석을 수행하기 전에, LUSAS 모델러에서 유로코드 **EN 1991-2:2023 Appendix D**에 따른 **Type 3** 열차 편성의 이동하중 표현을 정의해야 합니다.

참고. 이후 예제 진행 시 IMDPlus의 사용을 간편하게 하기 위해(**Analyses > IMDPlus** 메뉴에서 항목을 선택하는 대신) LUSAS 모델러에서 IMDPlus 툴바를 활성화하는 것을 권장합니다.

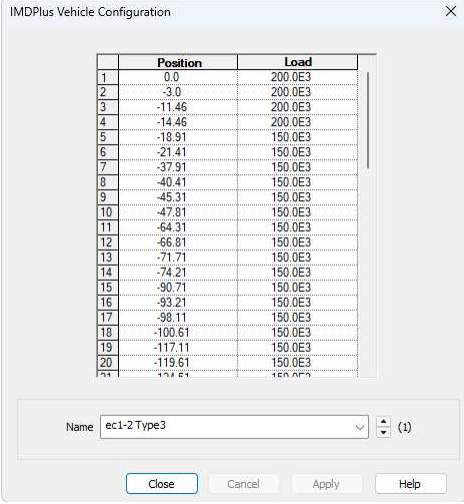
- **View > Toolbars...** 메뉴 항목을 선택하고, Toolbars 탭을 선택한 뒤, 목록에서 IMDPlus 옵션을 활성화하고 Close를 클릭합니다.
- IMDPlus 툴바가 활성화된 경우, 툴바에서 **Moving Load analysis**  버튼을 클릭하면 이동하중 해석이 선택되며 각 대화상자로 가는 도구 버튼

바로가기가 활성화됩니다.

Analyses> IMDPlus> Moving Load> Vehicle Configuration...

위의 메뉴를 실행하면 Moving Load Vehicle Configuration 대화상자가 표시됩니다.

이동하중 차량은 열차 앞부분을 기준으로 한 축 위치와 각 위치에 적용할 이동하중 계수로 정의합니다. 차량 정의를 간단히 하기 위해 위치와 하중 값을 엑셀 스프레드시트에 담아 두었으므로, 이를 복사해 대화상자에 붙여넣을 수 있습니다.



The dialog box titled 'IMDPlus Vehicle Configuration' contains a table with two columns: 'Position' and 'Load'. The table lists 20 rows of data. Below the table, there is a 'Name' field with a dropdown menu showing 'ec1-2 Type3' and a '(1)' indicator. At the bottom, there are four buttons: 'Close', 'Cancel', 'Apply', and 'Help'.

	Position	Load
1	0.0	200.0E3
2	-3.0	200.0E3
3	-11.46	200.0E3
4	-14.46	200.0E3
5	-18.91	150.0E3
6	-21.41	150.0E3
7	-37.91	150.0E3
8	-40.41	150.0E3
9	-45.31	150.0E3
10	-47.81	150.0E3
11	-64.31	150.0E3
12	-66.81	150.0E3
13	-71.71	150.0E3
14	-74.21	150.0E3
15	-90.71	150.0E3
16	-93.21	150.0E3
17	-98.11	150.0E3
18	-100.61	150.0E3
19	-117.11	150.0E3
20	-119.61	150.0E3

- 다운로드한 **ec1-2 Type3.xlsx** 스프레드시트를 찾아 엽니다.
- 첫 번째와 두 번째 열에 있는 60개의 위치 및 하중 값을 모두 선택하고 Ctrl+C를 이용해 클립보드로 복사합니다.
- 모델러 대화상자에서 그리드의 Position, Load 헤더를 모두 선택하고 Ctrl+V를 이용해 복사한 데이터를 그리드에 붙여넣습니다.
- 이름을 **ec1-2 Type3**로 입력합니다.

완료되면 대화상자가 다음과 같이 표시됩니다.

- OK를 클릭해 차량 구성을 생성합니다.

참고. 열차 편성 전체가 구조물을 통과하도록 하기 위해 축의 위치는 음수 값으로 정의됩니다. 음수 값은 위치 0에 있는 열차 앞부분보다 뒤쪽에 축을 배치합니다. 열차 앞부분의 이동은 경로의 시작부터 끝까지로 계산되며, 음수 위치의 모든 축이 경로를 통과할 수 있도록 IMDPlus 해석에 추가 시간이 포함됩니다.

축이 양수 값으로 정의된 경우, 이는 차량 구성에 입력한 위치만큼 경로를 따라 이미 진행한 거리를 의미합니다. 이를 고려해 경로 시작점을 정의하지 않으면, 양수 위치에 있는 축은 IMDPlus 해석 시작 시점에 이미 구조물 위에 있게 될 수 있습니다. 양수 위치를 사용하는 경우, 열차 전체가 구조물로 진입하는 과정을 올바르게 모델링할 수 있도록 경로 시작을 정의하는 라인에 충분한 여유 길이를 두어야 합니다.

참고. 열차 편성이나 차량을 한 번 정의하면 라이브러리에 저장할 수 있으며, 이후 해석에서는 위의 정의 과정을 다시 거치지 않고 가져와 사용할 수 있습니다. 이는 **File > Import/Export Model Data...** 메뉴 명령으로 접근하는 Library Browser를 통해 수행합니다.

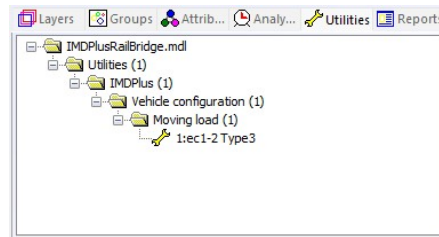
차량정보 가져오기

이 과정이 번거롭거나 이후 예제에 제시된 것과 같은 결과를 얻지 못하는 경우, 차량 정의는 다음 위치에 제공된 라이브러리에서 가져올 수 있습니다.

Ec1-2 Type3.lmd 파일에는 이 예제의 차량 라이브러리가 포함되어 있습니다.

File > Import/Export Model Data...

- 위의 메뉴를 실행하고, **Import from library to model** 옵션을 선택합니다.
- **Choose file...** 버튼을 클릭하고, **ec1-1 Type3.lmd** 파일을 찾아 선택합니다.
- 트리에서 **IMDPlus(1)** 항목을 선택합니다.
- OK 버튼을 클릭합니다.



차량 구성 속성을 정의하면 **Treeview> Utilities** 탭에 표시됩니다.

참고. 차량 구성 속성을 수정해야 하는 경우, 속성 이름을 마우스 왼쪽 버튼으로 더블클릭하거나 마우스 오른쪽 버튼으로 클릭한 뒤 Edit Attribute...를 선택하면 원래의 대화상자가 다시 열립니다.

이동하중 해석

이동하중 계산은 **IMDPlus(Interactive Modal Dynamics)** 기능을 이용해 수행합니다. 교량을 통과하는 열차의 이동하중 해석을 수행하려면 다음 세 단계를 거쳐야 합니다.

1. 디스크릿 포인트하중 또는 패치하중으로 정의한 단위하중을 이용해 이동하중이 지나갈 경로를 정의·설정합니다. 이 예제에서는 **Unit Axle Load**라는 디스크릿 포인트하중이 연직 방향으로 작용하는 단위 축하중으로 이미 정의되어 있습니다.
2. 이 단위하중을 이용해 경로를 따라 작용하는 하중을, IMDPlus 이동하중 해석에 적용할 모달 힘으로 변환합니다.
3. IMDPlus 이동하중 해석을 실행해 교량의 응답을 계산합니다.

참고. 이 과정은 IMDPlus 이동질량 해석 절차와 유사하지만, 열차 편성/차량이 스프링-매스 시스템이 아니라 일정한 힘으로 정의된다는 점이 다릅니다.

참고. IMDPlus 해석을 수행하려면 먼저 구조물을 통과할 하중을 디스크릿

IMDPlus를 이용한 열차 주행에 따른 교량의 진동 응답 해석

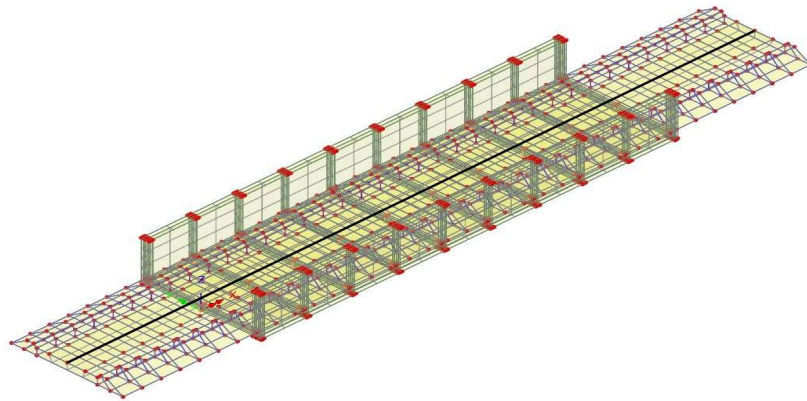
포인트하중 또는 패치하중으로 정의해야 합니다. 이 예제에서는 단위 축하중 하나를 디스크릿 포인트하중으로 정의해 이 과정을 이미 마쳤습니다. 단일 축을 정의해 두면, 배치마다 경로·모달 힘 단계를 반복하지 않고도 IMDPlus의 복합 축 정의 방식을 통해 다양한 하중 배치를 해석할 수 있습니다. 철도의 경우 열차 편성 전체에서 축간 거리가 일정하므로 보통 이 방법을 사용합니다. 축 폭이 서로 다른 이동하중의 경우에는 배치마다 경로·모달 힘 단계를 거쳐 하중을 완전히 정의해야 합니다.

이동하중 경로 정의

교량을 통과하는 열차를 해석하려면 이동하중의 경로를 정의해야 합니다. 이동하중 경로를 나타내는 **Line 12000**을 현재 선택 항목으로 지정합니다.

전체 모델을 다시 보려면 다음과 같이 합니다.

- **Treeview> Group 탭**에서 **IMDPlus Rail Bridge.mdl** 그룹 이름을 마우스 오른쪽 버튼으로 클릭하고 드롭다운 메뉴에서 **Visible** 옵션을 선택합니다. 하위 그룹에도 적용할지 묻는 메시지가 나오면 Yes를 클릭합니다.
- **Treeview> Layer 탭**에서 **Geometry** 레이어 이름을 더블클릭하고 OK 버튼을 클릭해 기본값을 적용합니다. 이렇게 하면 레이어도 켜집니다.
- 그림에 표시된 라인(**Line 12000**)을 선택합니다.



참고. 경로는 여러 개의 라인과 원호로 구성할 수 있지만, 이들은 분기 없이 하나의 연속된 경로를 이루어야 합니다.

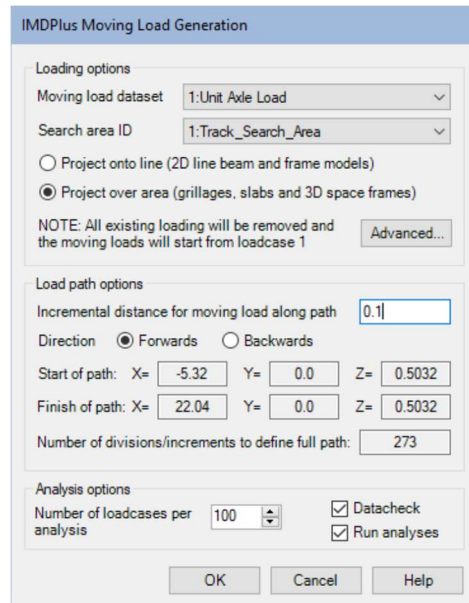
Analysis>IMDPlus> Moving Load> Moving Load Generation...

위의 메뉴를 실행하면 **IMDPlus Moving Load Generation** 대화상자가 열립니다.

IMDPlus Moving Load Generation 대화상자를 처음 열면, 사용 가능한 모든 디스크릿 하중과 **SearchArea**가 하중 옵션에 표시되며 현재 선택으로 정의된 경로에 대한 정보도 함께 표시됩니다.

이 예제에는 열차의 단일 축에서 오는 단위하중을 정의하는 **Unit Axle Load**라는 디스크릿 하중과, 강성·질량이 매우 작은 쉘에 할당된 Search Area가 있습니다.

- **Moving load dataset** 목록에서 **1:Unit Axle Load**가 선택되어 있는지 확인합니다.
- **Search area ID for the assignment of the discrete loading**에서 **1:Track_Search_Area**가 선택되어 있는지 확인합니다.
- **Project over area**가 선택되어 있는지 확인합니다.
- **Advanced** 버튼을 클릭해 하중 반영 방식을 조정합니다. **Moving Load Advanced Options** 대화상자에서 서치 에어리아 밖의 하중에 대해 **Include full load** 옵션을 선택하고 **OK** 버튼을 클릭합니다.
- **IMDPlus Moving Load Generation** 대화상자에서 **Incremental distance**를 **0.1**로 설정합니다.



The image shows the 'IMDPlus Moving Load Generation' dialog box. It is divided into three main sections: 'Loading options', 'Load path options', and 'Analysis options'.
 - **Loading options:** 'Moving load dataset' is set to '1:Unit Axle Load'. 'Search area ID' is set to '1:Track_Search_Area'. There are two radio buttons: 'Project onto line (2D line beam and frame models)' and 'Project over area (grillages, slabs and 3D space frames)', with the latter being selected. A note states: 'NOTE: All existing loading will be removed and the moving loads will start from loadcase 1'. An 'Advanced...' button is present.
 - **Load path options:** 'Incremental distance for moving load along path' is set to '0.1'. 'Direction' has radio buttons for 'Forwards' (selected) and 'Backwards'. 'Start of path' coordinates are X=-5.32, Y=0.0, Z=0.5032. 'Finish of path' coordinates are X=22.04, Y=0.0, Z=0.5032. 'Number of divisions/increments to define full path' is set to '273'.
 - **Analysis options:** 'Number of loadcases per analysis' is set to '100'. There are checkboxes for 'Datacheck' and 'Run analyses', both of which are checked.
 At the bottom are 'OK', 'Cancel', and 'Help' buttons.

참고. 서치 에어리아를 사용하면 Modeller Reference Manual에 설명된 대로 하중이 원하는 형상 요소에만 적용되도록 지정할 수 있습니다.

참고. **Incremental distance**는 기본적으로 하중이 이동하는 라인 길이의 10분의 1로 설정됩니다.

- **OK** 버튼을 클릭해 진행하고, 경고 메시지가 나오면 **Yes**를 선택해 현재 모델을 저장합니다.

이제 프로그램이 경로를 따라 단위 축의 274개 위치에 대한 하중 정보를 생성한 뒤 제어권을 LUSAS 모델러로 돌려줍니다. 이 과정은 하중의 횡방향 배치가 바뀌지 않는 한 반복할 필요가 없습니다. 철도의 경우 이런 변화가 없지만, 축간 거리나 타이어 배치가 달라질 수 있는 도로 해석에서는 필요할 수 있습니다.

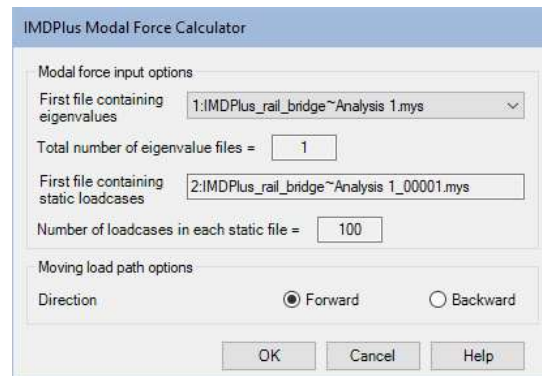
참고. 이 대화상자로 정의한 디스크리트 하중 위치는 하중 케이스가 최대 100개씩인 3개의 데이터파일로 정리되며, 해당 해석이 자동으로 수행됩니다. 이 해석들은 원본 모델과 같은 파일 이름에 숫자 표시(예: _00001, _00002 등)가 붙은 이름을 사용합니다. 이 해석 결과는 이후 모달 포스 계산 단계에 필요합니다.

이동하중에 대한 모달 힘 이력 생성하기

이전 단계에서 구조물을 통과하는 열차 축의 이동을 정의했습니다. 이제 **Modal Force Calculator**를 이용해 IMDPlus 해석에 사용할 모달 포스를 계산해야 합니다.

Analyses> IMDPlus> Moving Load> Modal Force Calculator...

위의 메뉴를 실행하여 **IMDPlus Modal Force Calculator** 대화상자를 엽니다.



- **OK** 버튼을 클릭해 기본 정보를 적용하고 진행합니다.

참고. 이 과정은 1단계에서 정의한 이동하중 경로나 배치가 변경되지 않는 한 반복할 필요가 없습니다.

이동하중 매개변수 정의

이제 IMDPlus 해석에 필요한 기본 이동하중 정보가 모두 정의되었습니다. 다음 단계에서는 포함할 모드, 감쇠, 속도 매개변수를 정의합니다.

Analyses> IMDPlus> Moving Load> Moving Load Analyses...

위의 메뉴를 실행하여, **IMDPlus Moving Load Analysis Control** 대화상자를 엽니다.

- 단위하중 축 정의를 사용하고 있으므로 **Vehicle Configuration (Composite axle)** 옵션을 클릭합니다.
- **Vehicle configuration**에 **1:ec1-2 Type3**가 포함되어 있는지 확인합니다.
- **Included modes**가 **All**로 설정되어 있는지 확인합니다. 그렇지 않다면 **Modify...** 버튼을 클릭해 **All modes** 옵션이 선택되어 있는지 확인합니다.
- **Default damping**이 **5.0**으로 선택되어 있는지 확인합니다. 다른 값이 표시되어 있으면 **Modify...** 버튼을 클릭해 **Default damping**을 **5.0**으로 설정합니다.
- **Solution control** 항목에서 **Modify...** 버튼을 클릭해 고급 해석 옵션을 변경합니다. **Defaults** 버튼을 클릭해 기본 옵션을 적용하고 **OK** 버튼을 클릭합니다.
- **Minimum Speed**를 **15**, **Maximum Speed**를 **70**, **Speed Increment**를 **5**로 입력합니다.
- 원하는 시간 간격을 직접 지정할 수 있도록 **IMDPlus determining time step**

(Nyquist) 옵션을 선택 해제합니다.

- **Solution time step**을 **1E-3**으로 입력합니다.
- **Next** 버튼을 클릭해 진행합니다. 전체 질량 중 상당 부분이 누락되었다는 메시지가 표시되면 **Yes**를 선택해 계속합니다. 이 해석에서는 35Hz 이하 주파수를 갖는 진동 모드의 기여만을 다루므로, 전체 질량의 90% 목표를 달성하지 못합니다.

위에서 입력한 정보로, 유로코드 **EN 1991-2:2023 Appendix D**에 따른 **Type 3** 열차(축 정보는 "ec1-2 Type3.xlsx" 파일에 있음)가 **15m/s**에서 **70m/s**까지 **5m/s** 간격(즉 54km/h에서 252km/h까지 18km/h 간격)의 속도 범위로 교량을 통과하는 경우를 해석합니다. **Quiet time**을 입력하면 열차가 경로 전체를 통과한 뒤 시간이력 그래프에서 교량의 응답이 감소하는 모습을 볼 수 있습니다. **Solution time step**은 해석에 사용할 시간 간격을 강제로 지정합니다.

이동하중 해석의 개별 절점·요소 결과 표시

IMDPlus Output Control 대화상자에서 모델의 결과 출력을 제어합니다.

변위 및 가속도 그래프

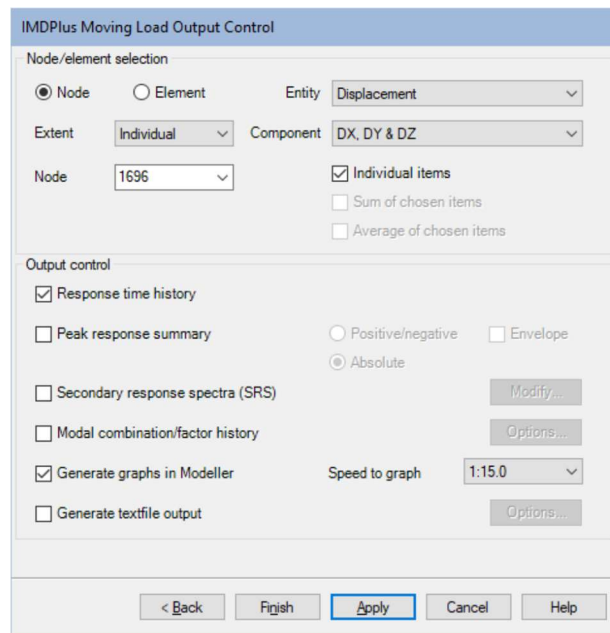
선택한 속도 범위에 대한 교량 경간 중앙의 응답을 살펴봅니다. 먼저 단일 속도 **15m/s(54km/h)**에서의 경간 중앙 변위를 확인합니다.

output control 대화상자에 다음 정보를 입력합니다.

- **Node**를 선택하고 **Extent**를 **Individual**로 설정합니다.
- 절점 번호를 **1696**으로 입력합니다(교량 경간 중앙, 교량 상판 중앙의 절점입니다).
- **DX, DY, DZ**의 **Displacement** 결과를 선택합니다.

IMDPlus를 이용한 열차 주행에 따른 교량의 진동 응답 해석

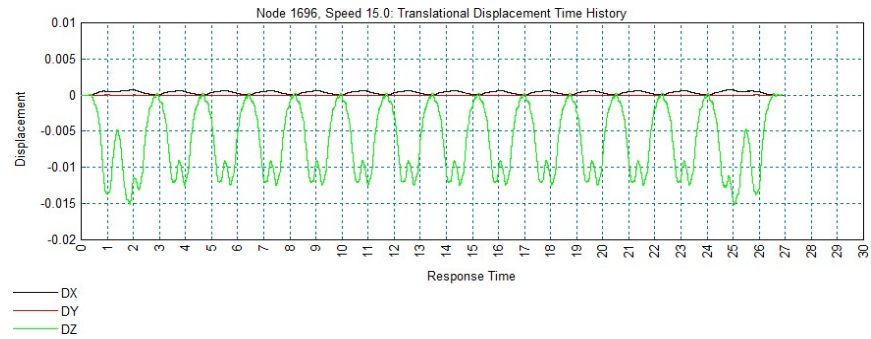
- **Individual items**가 선택되어 있는지 확인합니다. 개별 절점을 처리하는 중이므로 **Sum of chosen items**와 **Average of chosen items**는 사용할 수 없습니다.
- **Response time history**가 선택되어 있는지 확인합니다.
- **Generate graphs in Modeller**가 선택되어 있는지 확인합니다.
- **Speed to graph**가 **1:15.0**으로 설정되어 첫 번째 속도인 **15m/s**가 처리되도록 되어 있는지 확인합니다.
- Finish가 아닌 **Apply** 버튼을 클릭해 진행합니다.



The image shows the 'IMDPlus Moving Load Output Control' dialog box. It is divided into two main sections: 'Node/element selection' and 'Output control'. In the 'Node/element selection' section, 'Node' is selected, 'Entity' is 'Displacement', 'Extent' is 'Individual', 'Component' is 'DX, DY & DZ', and 'Node' is '1696'. Under 'Individual items', 'Individual items' is checked, while 'Sum of chosen items' and 'Average of chosen items' are unchecked. In the 'Output control' section, 'Response time history' is checked, 'Peak response summary' is unchecked, 'Secondary response spectra (SRS)' is unchecked, 'Modal combination/factor history' is unchecked, and 'Generate graphs in Modeller' is checked. The 'Speed to graph' is set to '1:15.0'. There are also options for 'Positive/negative', 'Envelope', and 'Absolute' (which is selected). At the bottom, there are buttons for '< Back', 'Finish', 'Apply' (highlighted with a blue border), 'Cancel', and 'Help'.

참고. Finish 대신 Apply 버튼을 클릭하면 이후 다른 그래프를 그릴 때도 IMDPlus Control 대화상자를 계속 이용할 수 있습니다.

이제 IMDPlus 해석이 실행됩니다.



- 그래프가 표시되어 확인했으면 그래프를 닫습니다.

이제 단일 속도 15m/s(54km/h)에서의 경간 중앙 연직 가속도 응답을 살펴봅니다.

IMDPlus 툴바가 활성화된 경우,

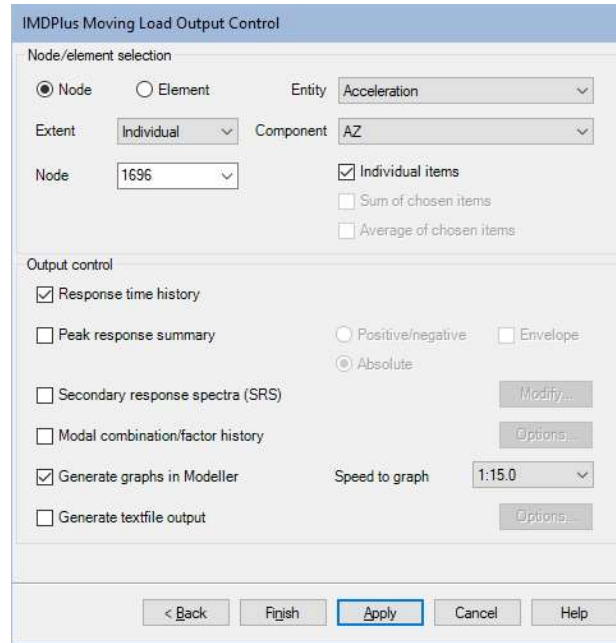
- 툴바의  버튼을 클릭해 **IMDPlus Output Control** 대화상자를 엽니다.

IMDPlus 툴바가 활성화되어 있지 않은 경우,

Analyses> IMDPlus> Moving Load> Moving Load Analysis...

메뉴를 실행하여 **IMDPlus Moving Load Analysis Control** 대화상자를 열고 **Next >**를 클릭해 기존 해석 제어 설정을 유지한 채 **IMDPlus Output Control** 대화상자를 엽니다.

IMDPlus를 이용한 열차 주행에 따른 교량의 진동 응답 해석



The dialog box is titled "IMDPlus Moving Load Output Control". It is divided into two main sections: "Node/element selection" and "Output control".

Node/element selection:

- ☒ Node ☐ Element
- Entity: Acceleration
- Extent: Individual
- Component: AZ
- Node: 1696
- ☒ Individual items
- ☐ Sum of chosen items
- ☐ Average of chosen items

Output control:

- ☒ Response time history
- ☐ Peak response summary
- ☐ Secondary response spectra (SRS)
- ☐ Modal combination/factor history
- ☒ Generate graphs in Modeller
- ☐ Generate textfile output

Additional options:

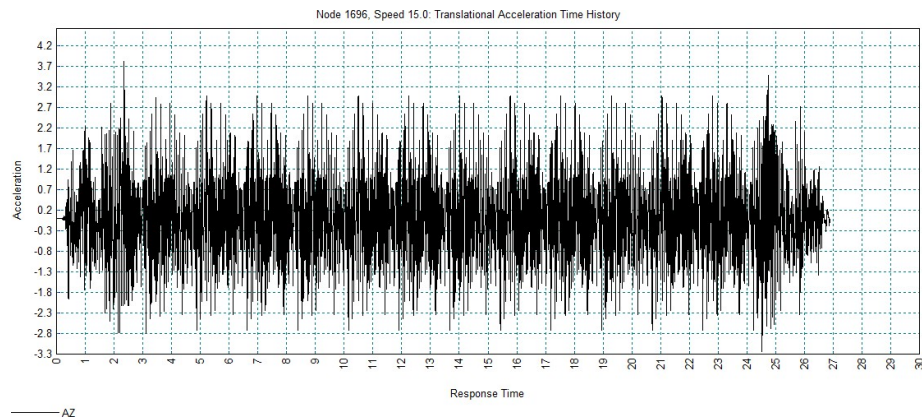
- Positive/negative: ☐ Envelope
- Absolute: ☒
- Speed to graph: 1:15.0

Buttons at the bottom: < Back, Finish, Apply (highlighted), Cancel, Help.

IMD Output Control 대화상자에서 연직 성분인 **AZ**의 **Acceleration** 결과만 선택합니다.

- Finish가 아닌 **Apply** 버튼을 클릭해 진행합니다.

참고. 가속도 결과는 변위 결과와 동시에 계산되었으므로 IMDPlus를 다시 실행할 필요가 없습니다.



- 그래프가 표시되면 그래프를 닫습니다.

앞서 단일 열차 속도에서 교량 상판 경간 중앙의 변위·가속도 응답을 살펴보았습니다. 이제 앞서 이동하중 해석 제어 대화상자에서 지정한 **15m/s**에서 **70m/s**까지의 속도 범위에 대해, 경간 중앙의 최대 양·음 연직 변위 및 가속도 응답을 살펴봅니다.

IMDPlus 툴바가 활성화된 경우,

- 툴바의  버튼을 클릭해 **IMDPlus Output Control** 대화상자를 엽니다.

IMDPlus 툴바가 활성화되어 있지 않은 경우,

Analyses> IMDPlus> Moving Load> Moving Load Analysis...

메뉴를 실행하여 **IMDPlus Moving Load Analysis Control** 대화상자를 열고 **Next >**를 클릭해 기존 해석 제어 설정을 유지한 채 **IMDPlus Output Control** 대화상자를 엽니다.

- **IMDPlus Output Control** 대화상자에서 연직 성분인 **DZ**의 **Displacement** 결과만 선택합니다.
- **Response time history** 옵션을 선택 해제합니다.
- **Peak response summary** 옵션을 선택합니다.
- **Positive/negative** 옵션을 선택합니다.
- **Apply** 버튼을 클릭해 진행합니다.

IMDPlus를 이용한 열차 주행에 따른 교량의 진동 응답 해석

IMDPlus Moving Load Output Control

Node/element selection

☒ Node ☐ Element Entity: Displacement

Extent: Individual Component: DZ

Node: 1696

☒ 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...

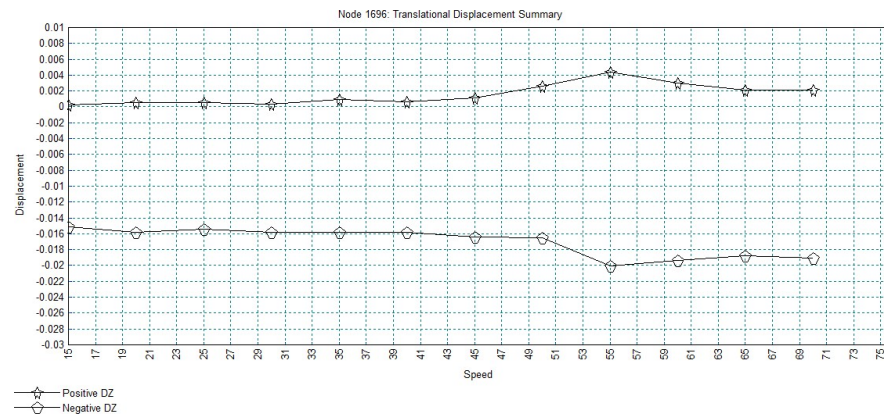
☐ Modal combination/factor history Options...

☒ Generate graphs in Modeller Speed to graph: 1:15.0

☐ Generate textfile output Options...

< Back Finish Apply Cancel Help

이제 IMDPlus 해석이 실행됩니다.



- 그래프가 표시되면 그래프를 닫습니다.

IMDPlus 툴바가 활성화된 경우,

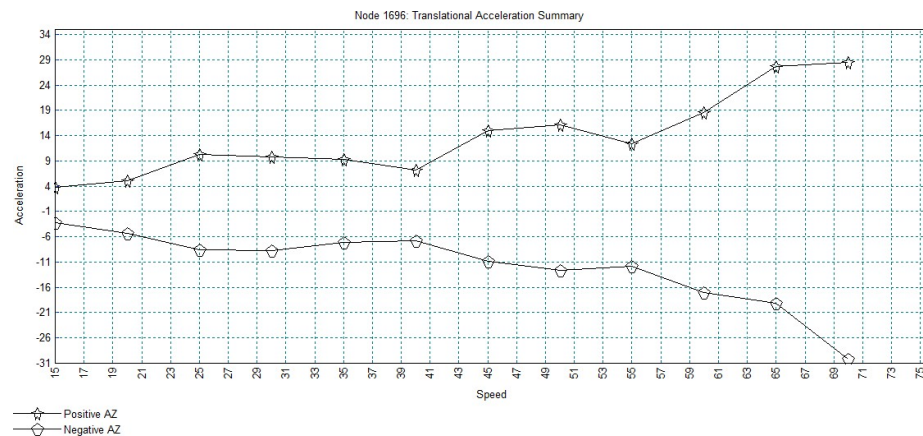
- 툴바의  버튼을 클릭해 **IMDPlus Output Control** 대화상자를 엽니다.

IMDplus 툴바가 활성화되어 있지 않은 경우,

Analyses>IMDPlus>Moving Load> Moving Load Analysis...

위의 메뉴를 실행하여 **IMDPlus Moving Load Analysis Control** 대화상자를 열고 **Next >**를 클릭해 기존 해석 제어 설정을 유지한 채 **IMDPlus Output Control** 대화상자를 엽니다.

- 연직 성분인 **AZ**의 **Acceleration** 결과만 선택합니다.
- **Apply** 버튼을 클릭해 경간 중앙의 속도별 가속도 그래프를 표시합니다.



- 그래프가 표시되면 그래프를 닫습니다.

헬의 응력 그래프

앞 절에서는 교량 경간 중앙의 변위·가속도 응답을 살펴보았습니다. 이제 주형의 복부에 발생하는 단면력을 살펴봅니다. 앞서 확인한 대로, 근접측 주형 복부 중앙에 있는 Element 1209의 결과를 살펴봅니다.

IMDPlus를 이용한 열차 주행에 따른 교량의 진동 응답 해석

IMDPlus 툴바가 활성화된 경우,

- 툴바의  버튼을 클릭해 **IMDPlus Output Control** 대화상자를 엽니다.

IMDplus 툴바가 활성화되어 있지 않은 경우,

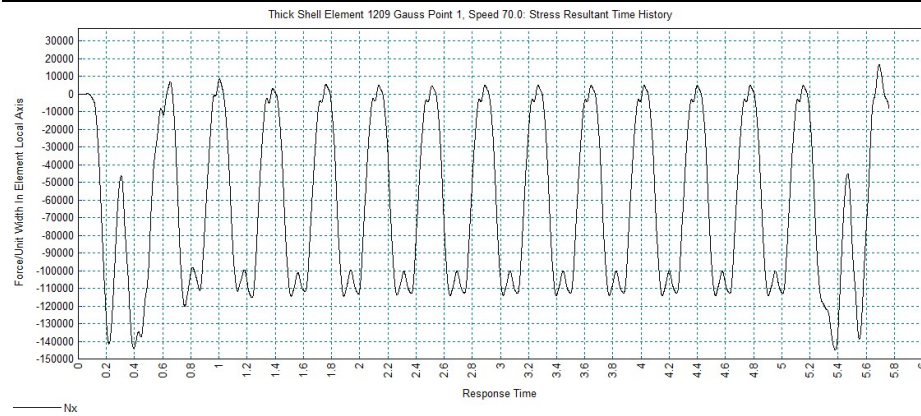
Analyses> IMDPlus> Moving Load> Moving Load Analysis...

메뉴를 실행하여, **IMDPlus Moving Load Analysis Control** 대화상자를 열고 **Next >**를 클릭해 기존 해석 제어 설정을 유지한 채 **IMDPlus Output Control** 대화상자를 엽니다.

IMDPlus Output Control 대화상자에 다음 정보를 입력합니다.

- **Element**를 선택하고 **Extent**가 **Individual**로 유지되어 있는지 확인합니다.
- 요소 번호를 **1209**로 입력합니다.
- **Gauss Point**를 **1**로 설정합니다.
- 교량 종방향 단면력인 Nx의 Force/Moment – Thick Shell 결과를 선택합니다.
- **Individual items**가 선택되어 있는지 확인합니다. '**Sum of chosen items**'와 '**Average of chosen items**'는 개별 요소를 처리하는 중이므로 사용할 수 없습니다.
- **Response time history** 옵션이 선택되어 있는지 확인합니다.
- **Peak response summary** 옵션을 선택 해제합니다.
- **Speed to graph**를 **12:70.0**으로 설정해, 목록의 열두 번째 속도인 **70m/s**가 처리되도록 합니다.
- **Apply** 버튼을 클릭해 **Element 1209**의 **Gauss Point1**에 대한 **Nx-시간** 그래프를 표시합니다.

이제 IMDPlus 해석이 실행되어 **Element 1209**의 **Gauss Point 1**에 대한 **Nx-시간** 그래프가 표시됩니다.



- 그래프가 표시되면 그래프를 닫습니다.

IMDPlus 툴바가 활성화된 경우,

- 툴바의  버튼을 클릭해 **IMDPlus Output Control** 대화상자를 엽니다.

IMDPlus 툴바가 활성화되어 있지 않은 경우,

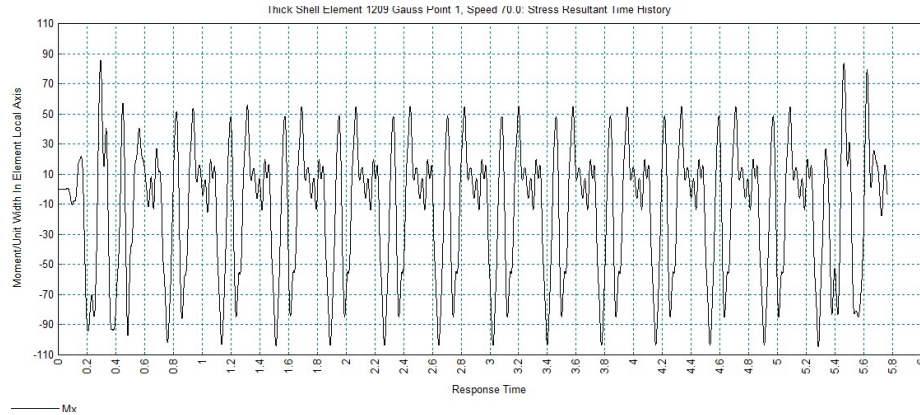
Analyses > IMDPlus > Moving Load > Moving Load Analyses...

위의 메뉴를 실행하여, **IMDPlus Moving Load Analysis Control** 대화상자를 열고 **Next >**를 클릭해 기존 해석 제어 설정을 유지한 채 **IMDPlus Output Control** 대화상자를 엽니다.

- 교량 진행방향 모멘트인 **Mx**의 **Force/Moment – Thick Shell** 결과를 선택합니다.
- 다른 옵션은 이전 상태 그대로 두고 **Apply** 버튼을 클릭해 진행합니다.

잠시 후 **Element 1209**의 **Gauss Point 1**에 대한 **Mx-시간** 그래프가 생성됩니다.

IMDPlus를 이용한 열차 주행에 따른 교량의 진동 응답 해석



- 그래프가 표시되면 그래프를 닫습니다.

IMDPlus 툴바가 활성화된 경우,

- 툴바의  버튼을 클릭해 IMDPlus Output Control 대화상자를 엽니다.

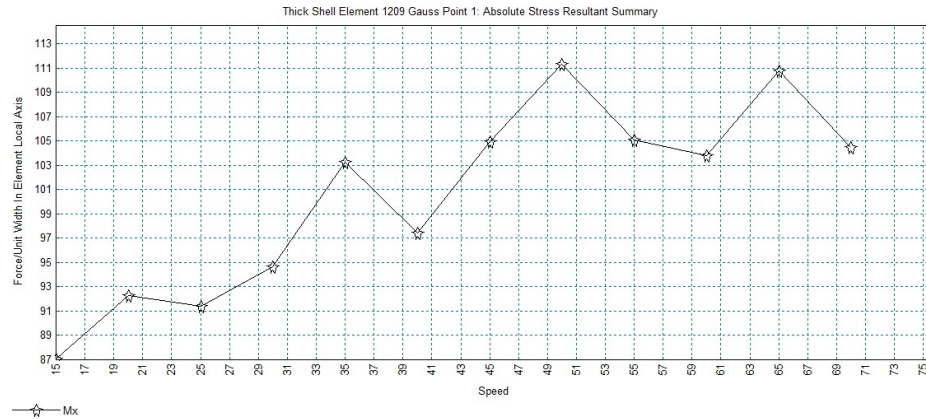
IMDPlus 툴바가 활성화되어 있지 않은 경우,

Analyses> IMDPlus> Moving Load> Moving Load Analysis...

위의 메뉴를 실행하여, **IMDPlus Moving Load Analysis Control** 대화상자를 열고 **Next >**를 클릭해 기존 해석 제어 설정을 유지한 채 **IMDPlus Output Control** 대화상자를 엽니다.

- **Response time history** 옵션을 선택 해제합니다.
- **Peak response summary** 옵션을 선택하고 **Absolute**를 선택합니다.
- **Finish** 버튼을 클릭합니다.
- IMDPlus가 생성한 임시 파일을 삭제하여 디스크 공간을 확보할지 묻는 메시지가 표시되면 **Yes**를 클릭합니다.

Element 1209의 Gauss Point 1에 대한 Mx 절대 최대값-속도 그래프가 생성됩니다.



- 그래프 창을 닫습니다.

선택한 절점·요소 집합의 결과 표시

앞에서는 구조물의 개별 절점·요소를 이용한 해석을 다루었습니다. 다음은 선택한 절점·요소 집합을 이용해 다음과 같은 교량 구조물의 결과를 살펴봅니다.

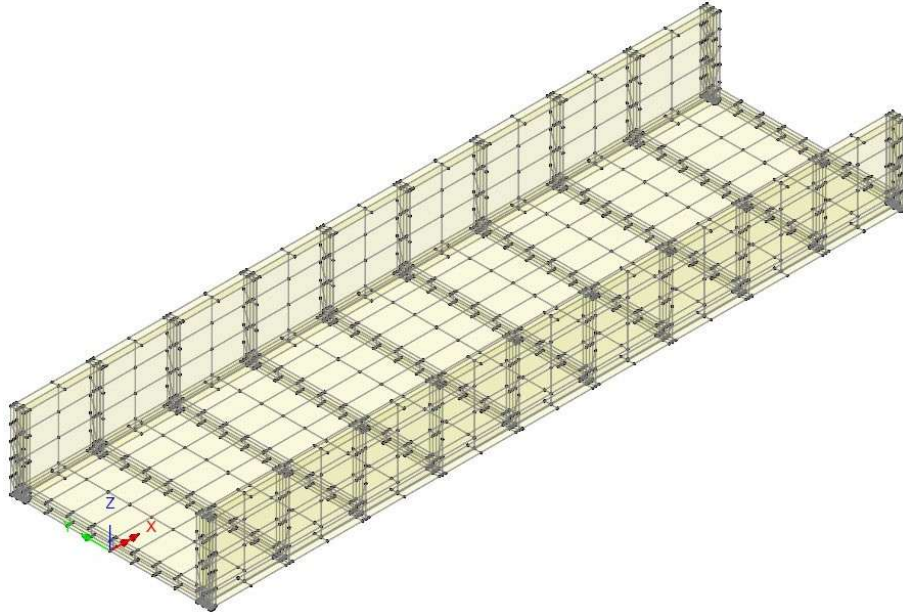
- ☐ 평균 및 최대 변위와 동적증폭계수
- ☐ 합산 반력 및 최대 반력
- ☐ 측면 패널의 평균 및 최대 응력

교량 구조물의 평균 및 최대 변위와 동적증폭계수

평균 및 최대 변위와 동적증폭계수를 확인하려면, 교량 구조물의 모든 절점을 포함하는 절점 집합을 만들어야 합니다.

- Treeview> Layer 탭에서 Geometry 레이어를 끕니다.
- Treeview> Group 탭에서 Bridge_Structure 그룹 이름을 마우스 오른쪽 버튼으로 클릭하고 드롭다운 메뉴에서 Set as Only Visible 옵션을 선택합니다.

다음 그림과 같이 Select Nodes  로 모델 주위에 박스를 드래그해 교량 구조물의 절점 1665개를 모두 선택합니다.



Analyses> IMDPlus> Moving Load> Moving Load Analysis...

- 위의 메뉴를 통해 **IMDPlus Moving Load Analysis Control** 대화상자를 열거나 툴바의  버튼을 클릭합니다.
- **IMDPlus Moving Load Analysis Control** 대화상자에서 **Next** 버튼을 클릭해 앞서 정의한 값을 적용합니다. 전체 질량 참여율에 대한 메시지가 표시되면 **Yes** 버튼을 클릭해 계속합니다.

IMDPlus Output Control 대화상자에 다음 정보를 입력합니다.

- **Node**를 선택하고 드롭다운 목록에서 **Extent**를 **Selected**로 변경합니다. 이렇게 하면 앞 단계에서 선택한 교량 구조물의 **절점 1665개**가 모두 선택됩니다.
- 결과 항목으로 **Displacement**, 성분으로 **DZ**를 선택합니다.
- **Individual items**를 선택 해제합니다.
- 선택한 절점의 평균 결과만 살펴볼 것이므로 **Average of chosen items**를 선택합니다.
- **Peak response summary**가 계속 선택되어 있는지 확인한 뒤 **Positive/negative**와 **Envelope**를 선택합니다.
- **Generate graphs in Modeller**가 계속 선택되어 있는지 확인합니다.
- **Apply** 버튼을 클릭해 해석을 수행합니다. 선택한 절점을 모두 처리할지 묻는 메시지가 표시되면 **Yes**를 클릭합니다.

이제 IMDPlus 해석이 실행됩니다.

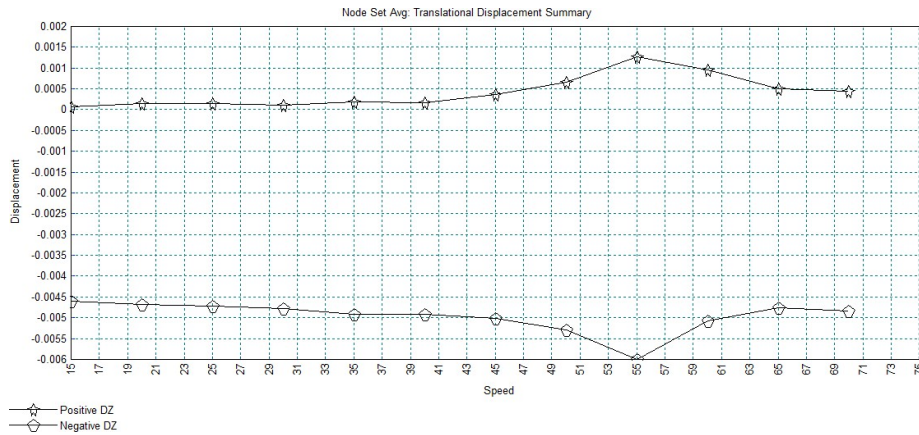
참고. IMDPlus 해석에서는 **Individual items**, **Sum of chosen items**, **Average of chosen items** 출력 옵션을 조합해 함께 사용할 수 있습니다. 다만 **Extent**가 **Selected**나 **All**(절점 또는 요소)로 설정된 상태에서 **Individual items** 옵션을 사용하면, 처리 대상 절점·요소 수에 따라 매우 많은 그래프가 생성될 수 있습니다.

참고. **Average of chosen items**는 먼저 선택한 절점들의 결과를 합산한 뒤, 이 합산 결과를 단순 평균하여 절점 평균 시간이력을 구하고, 여기서 평균 최대값 결과를 얻습니다.

해석한 **15m/s**에서 **70m/s**까지 전체 속도에 대해, 평균 연직(DZ) 변위의 최대 양·음 값을 나타내는 그래프가 다음 그림과 같이 표시됩니다. 옆의 데이터 표를 보면 가장 큰

IMDPlus를 이용한 열차 주행에 따른 교량의 진동 응답 해석

최대값은 속도 55m/s에서 발생하며, 양의 최대값은 0.0013m, 음의 최대값은 -0.006m임을 알 수 있습니다.



선택한 절점들의 최대 변위·회전 포락선이 메모장 화면에 표시되며, **WLUSASFiles32\IMDPlus_rail_bridge\IMDPlus_Graphing**폴더의 **peak_dspSet1.sum** 파일에 기록됩니다.

해석한 모든 속도를 살펴보면, 개별 절점의 최대 연직(DZ) 변위 역시 이동하중 속도 55m/s에서 발생함을 알 수 있습니다.

```
# +-----+
# | Speed = 55.000000000000 |
# +-----+
#
# Entity          Time          Value          Node
Peak_Pos_DX       6.807000000    0.3171215952E-002    1052
Peak_Neg_DX       6.815000000   -0.1438707644E-002    2416
Peak_Pos_DY       6.830000000    0.1429801729E-001    1641
Peak_Neg_DY       6.834000000   -0.1430789598E-001    1720
Peak_Pos_DZ       4.656000000    0.4399301289E-002    1648
Peak_Neg_DZ       6.826000000   -0.2032896221E-001    1648
Peak_Pos_THX      6.837000000    0.1274026641E-001    1718
Peak_Neg_THX      6.837000000   -0.1267684300E-001    1697
Peak_Pos_THY      6.974000000    0.5644280262E-002     974
Peak_Neg_THY      0.575000000   -0.6119502396E-002    2309
Peak_Pos_THZ      0.468000000    0.4478363560E-002    1885
Peak_Neg_THZ      7.150000000   -0.4301679976E-002    2301
#
```

Z방향 변위의 최대 양·음 값은 모두 절점 1648에서 발생하며, 각각 4.656초에서 0.0044m, 6.826초에서 -0.0203m입니다.

참고. IMDPlus는 교량 구조물 전체 절점의 개별 결과를 검토하여 최대 결과의 포락선을 구합니다. 이를 통해 최대값·최솟값이 발생하는 절점 위치를 빠르게 확인할 수 있습니다.

- 메모장 프로그램과 그래프 창을 닫습니다.

IMDPlus 툴바가 활성화된 경우,

- 툴바의  버튼을 클릭해 **IMDPlus Output Control** 대화상자를 엽니다.

IMDPlus 툴바가 활성화되어 있지 않은 경우,

Analyses> IMDPlus> Moving Load> Moving Load Analysis...

메뉴를 실행하여, **IMDPlus Moving Load Analysis Control** 대화상자를 열고 **Next >**를 클릭해 기존 해석 제어 설정을 유지한 채 **IMDPlus Output Control** 대화상자를 엽니다.

- **IMDPlus Output Control** 대화상자에 다음 정보를 입력합니다.
- **Node**와 **extent**가 **Selected**로 선택되어 있는지 확인합니다.
- 결과 항목으로 **Dynamic Amplification Factor**, 성분으로 **DAF_RSLT**를 선택합니다.
- **Average of chosen items**가 선택되어 있는지 확인합니다.
- **Peak response summary**와 **Envelope**가 계속 선택되어 있는지 확인하고 **Absolute**를 선택합니다.
- **Finish** 버튼을 클릭합니다.
선택한 절점을 모두 처리할지 묻는 메시지가 표시되면 **Yes**를 클릭합니다.
- IMDPlus가 생성한 임시 파일을 삭제하여 디스크 공간을 확보할지 묻는 메시지가 표시되면 **Yes**를 클릭합니다.

IMDPlus를 이용한 열차 주행에 따른 교량의 진동 응답 해석

IMDPlus Moving Load Output Control

Node/element selection

☒ Node ☐ Element Entity: Dynamic Amplification Factor

Extent: Selected Component: DAF_RSLT

Node: 1696

☐ 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...

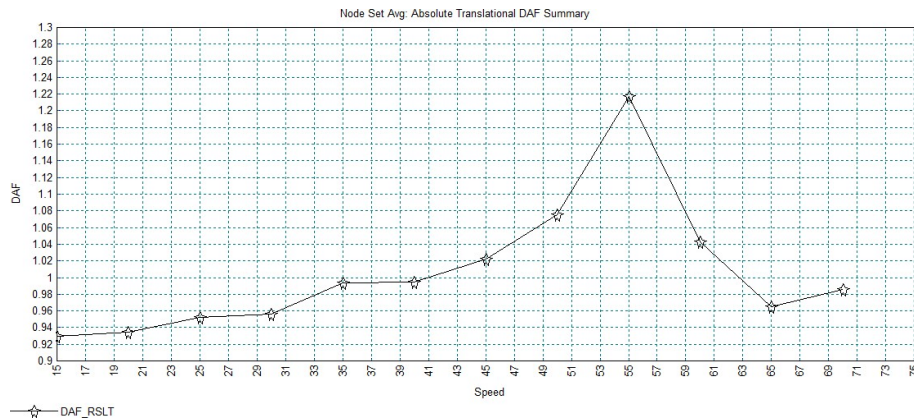
☒ Generate graphs in Modeller Speed to graph: 12.70.0

☐ Generate textfile output Options...

< Back Finish Apply Cancel Help

평균 합성 동적증폭계수의 절대 최대값을 속도 별로 나타내는 그래프가 다음 그림과 같이 표시됩니다. 옆의 데이터 표를 보면 최대 평균 **DAF 1.217**이 속도 **55m/s**에서 발생함을 알 수 있습니다.

참고. 절점 집합에 대해서는 평균 동적증폭계수 결과만 얻을 수 있습니다. 이 결과 항목은 합산 결과가 의미가 없기 때문입니다.



선택한 절점들의 최대 동적증폭계수 포락선이 메모장 화면에 표시되며,
WLUSASFiles32\WMDPlus_rail_bridge\WMDPlus_Graphing 폴더의

Abs_peak_dafSet1.sum 파일에 기록됩니다.

```
#
# +-----+
# | Speed = 60.000000000000 |
# +-----+
#
# Entity              Time              Value              Node
Abs_Peak_DAF_DX       6.284000000      1.923285713        1081
Abs_Peak_DAF_DY       0.670000000      2.913361939        1761
Abs_Peak_DAF_DZ       0.531000000      1.702843564         16
Abs_Peak_DAF_THX      0.671000000      6.930650787        2161
Abs_Peak_DAF_THY      6.351000000      1.646075290        1320
Abs_Peak_DAF_THZ      0.585000000      2.616078282        1136
Abs_Peak_RSLT         0.531000000      1.758098852         41
#
```

이 결과에서 개별 절점의 최대 합성 DAF는 속도 60m/s에서 발생하며, 절점 41에서 해석 시간 0.53초에 값 1.76이 계산됩니다.

- 메모장 프로그램과 그래프 창을 닫습니다.

교량 구조물의 합산 반력 및 최대 반력

이제 이동하중 속도별로 교량 구조물에 작용하는 합산 반력과 최대 반력을 살펴봅니다. 앞 절의 절점 집합을 그대로 사용할 수도 있지만, IMDPlus 해석의 효율을 높이기 위해 지점 절점을 포함하는 형상 요소만 남도록 선택 절점 범위를 줄입니다.

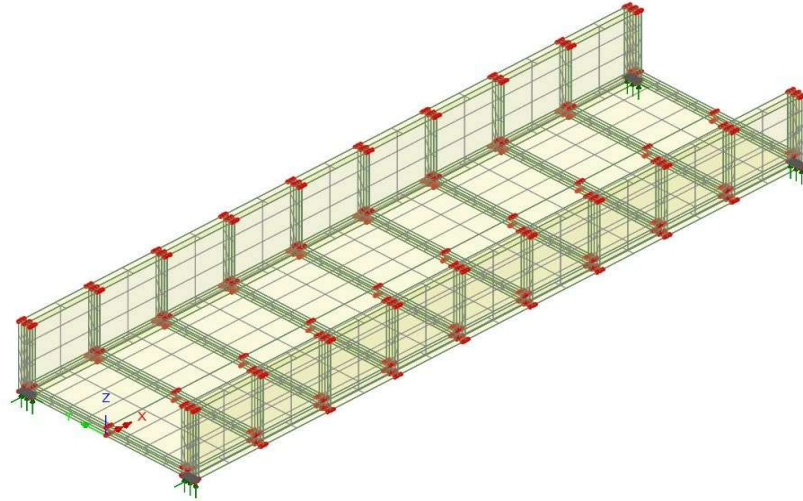
- 뷰 창의 빈 부분을 마우스 왼쪽 버튼으로 클릭하여 앞 절에서 만든 절점 선택을 해제합니다.

LUSAS 뷰 창에서 **Supports on/off**  버튼을 클릭해 모델의 지점 절점을 표시합니다.

- **Treeview> Group** 탭에서 **Bridge_Structure** 그룹 이름을 마우스 오른쪽 버튼으로 클릭하고 드롭다운 메뉴에서 **Set as Only Visible** 옵션을 선택합니다.

- **Treeview> Layer** 탭에서 **Geometry** 레이어를 켵니다.

다음 그림과 같이 **Select Volumes**  커서로 교량 구조물 전체 주위에 박스를 드래그해, 교량 지점 바로 위의 볼륨을 선택합니다.



- 뷰 창의 빈 부분을 마우스 오른쪽 버튼으로 클릭하고 Keep as Only Visible 옵션을 선택합니다. 선택한 볼륨만 화면에 남습니다.

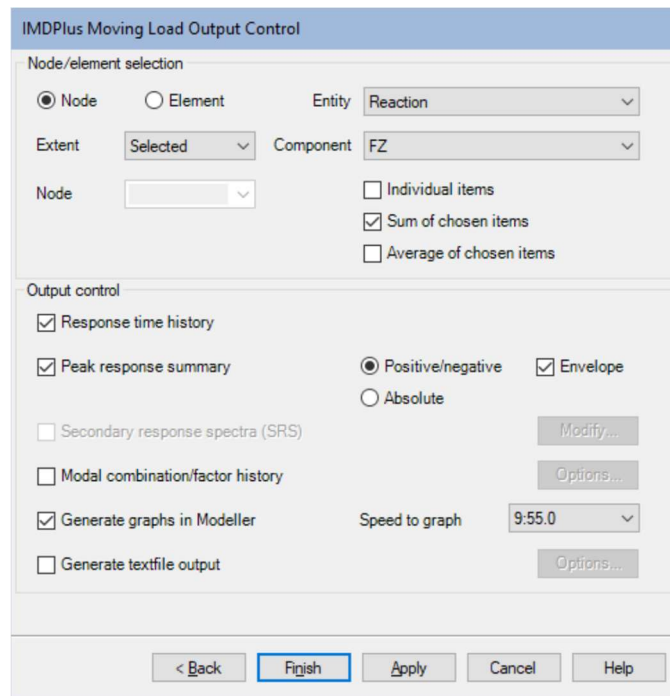
다음 그림과 같이 **Select Nodes**  커서로 박스를 드래그해 화면에 표시된 교량 구조물의 **절점 120개**를 선택합니다.



Analyses> IMDPlus> Moving Load> Moving Load Analysis...

위의 메뉴를 실행하여, **IMDPlus Moving Load Analysis Control** 대화상자를 엽니다.

- **Next** 버튼을 클릭해 앞서 정의한 값을 적용합니다. 전체 질량 참여율에 대한 메시지가 표시되면 **Yes** 버튼을 클릭해 계속합니다.
- **IMDPlus Output Control** 대화상자에 다음 정보를 입력합니다.



The image shows the 'IMDPlus Moving Load 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' is set to 'Reaction'.
- Extent:** Set to 'Selected'.
- Component:** Set to 'FZ'.
- Node:** A dropdown menu is present.
- Options:**
 - ☐ Individual items
 - ☒ Sum of chosen items
 - ☐ Average of chosen items

Output control:

- ☒ Response time history
- ☒ Peak response summary
- ☐ Secondary response spectra (SRS)
- ☐ Modal combination/factor history
- ☒ Generate graphs in Modeller
- ☐ Generate textfile output
- Speed to graph:** Set to 9.55.0
- Options:**
 - ☒ Positive/negative
 - ☐ Absolute
 - ☒ Envelope

Buttons at the bottom: < Back, Finish (highlighted), Apply, Cancel, Help.

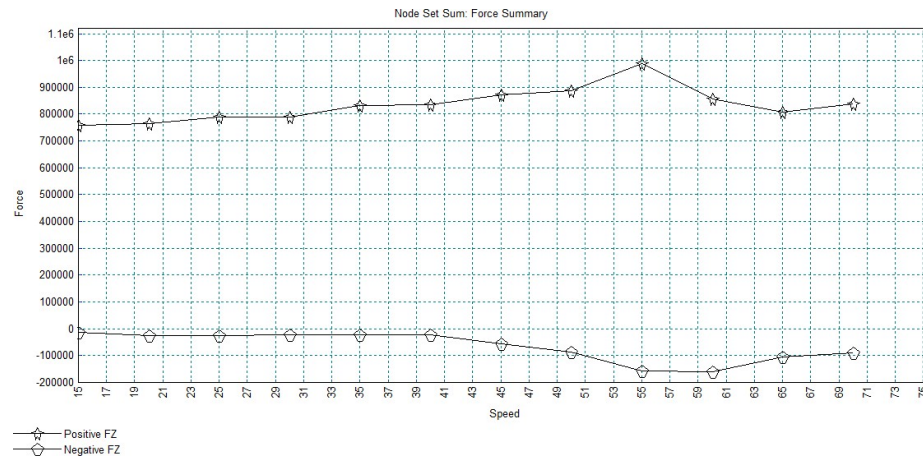
- **Node**를 선택하고 **Extent**가 **Selected**로 유지되어 있는지 확인합니다. 이렇게 하면 앞 단계에서 선택한 교량 구조물의 **절점 120개**가 선택됩니다.
- 결과 항목으로 **Reaction**, 성분으로 **FZ**를 선택합니다.
- **Average of chosen items**를 선택 해제합니다.
- **Sum of chosen items**를 선택합니다. **Individual items**가 계속 선택 해제되어 있는지 확인합니다.
- **Response time history**를 선택합니다.
- **Peak response summary**와 **Envelope**가 계속 선택되어 있는지 확인하고 **Positive/negative**를 선택합니다.
- **Generate graphs in Modeller**가 계속 선택되어 있는지 확인합니다.
- **Speed to graph**를 **9:55.0**으로 설정해, 목록의 아홉 번째 속도인 **55m/s**가 처리되도록 합니다.
- **Finish** 버튼을 클릭해 절점 집합에 대한 해석을 수행합니다. 선택한 절점을 모두 처리할지 묻는 메시지가 표시되면 **Yes**를 클릭합니다.
- IMDPlus가 생성한 임시 파일을 삭제하여 디스크 공간을 확보할지 묻는 메시지가 표시되면 **Yes**를 클릭합니다.

참고. **Sum of chosen items**는 선택한 절점들의 결과를 모두 더해 절점 합산 시간이력을 구하고, 여기서 합산 결과의 최대값을 얻습니다.

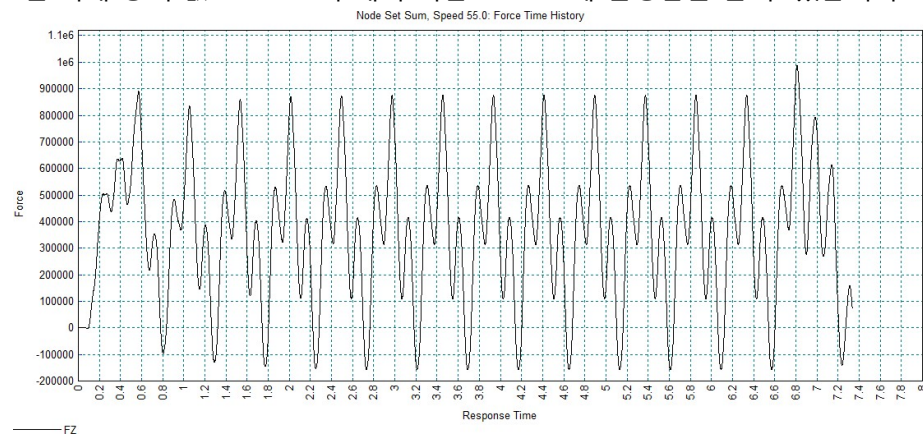
참고. **Average of chosen items**는 먼저 선택한 절점들의 결과를 합산한 뒤, 이 합산 결과를 단순 평균하여 절점 평균 시간이력을 구하고, 여기서 평균 최대값 결과를 얻습니다.

교량 구조물에 작용하는 총 연직 반력을 나타내는 절점 합산 결과가 표시됩니다. 해석한 전체 속도에 대한 Z방향 합산 반력의 최대 양·음 값 그래프가 다음 그림과 같이 표시됩니다.

옆의 데이터 표를 보면, 속도별 결과에서 열차 속도 **55m/s**일 때 최대 양의 반력 **986.8kN**이, 속도 **60m/s**일 때 최대 음의(들뜸) 반력 **-161.3kN**이 발생함을 알 수 있습니다.



또한 Window 메뉴 항목에서 확인할 수 있듯이, 다음 그림은 해석 속도 55m/s에서의 합산 FZ 반력 시간이력을 보여줍니다. 이 속도의 그래프 데이터를 보면 최대 양의 값 986.8kN이 해석 시간 6.812초에 발생함을 알 수 있습니다.



peak_rctSet1.sum 파일의 최대 반력 포락선이 메모장 프로그램에 표시됩니다. 이는 해석한 각 이동하중 속도에 대해 교량 구조물의 모든 개별 절점에서 얻은 최대 반력을 요약한 것입니다. 살펴보는 연직(FZ) 성분에서는, 최대 양의 반력(하향력에 의한)이 항상 절점 82에서, 최대

IMDPlus를 이용한 열차 주행에 따른 교량의 진동 응답 해석

음의 반력(상향력에 의한)이 항상 **절점 74**에서 발생함을 일관되게 보여줍니다.
속도 **55m/s**와 **60m/s**에 대한 결과는 다음 그림과 같습니다.

```
#
# +-----+
# | Speed = 55.000000000000 |
# +-----+
#
# Entity          Time          Value          Node
Peak_Pos_FX      6.756000000    51590.11153     10
Peak_Neg_FX      4.576000000    -18943.56117     10
Peak_Pos_FY      7.020000000    20253.47239     82
Peak_Neg_FY      6.996000000    -17812.56105     10
Peak_Pos_FZ      0.575000000    215646.8013     82
Peak_Neg_FZ      6.944000000    -139145.0325     74
Peak_Pos_MX      N/A             N/A             N/A
Peak_Neg_MX      N/A             N/A             N/A
Peak_Pos_MY      N/A             N/A             N/A
Peak_Neg_MY      N/A             N/A             N/A
Peak_Pos_MZ      N/A             N/A             N/A
Peak_Neg_MZ      N/A             N/A             N/A
#
#
# +-----+
# | Speed = 60.000000000000 |
# +-----+
#
# Entity          Time          Value          Node
Peak_Pos_FX      6.195000000    47446.85974     10
Peak_Neg_FX      0.697000000    -16327.48305     10
Peak_Pos_FY      0.672000000    20991.32218     10
Peak_Neg_FY      0.702000000    -19540.90538     10
Peak_Pos_FZ      0.533000000    211903.9209     82
Peak_Neg_FZ      6.368000000    -146751.0992     74
Peak_Pos_MX      N/A             N/A             N/A
Peak_Neg_MX      N/A             N/A             N/A
Peak_Pos_MY      N/A             N/A             N/A
Peak_Neg_MY      N/A             N/A             N/A
Peak_Pos_MZ      N/A             N/A             N/A
Peak_Neg_MZ      N/A             N/A             N/A
#
```

위 데이터를 보면, 속도 **55m/s**에서는 시간 **0.575초**에 **최대 양의 반력 215.6kN**이, 속도 **60m/s**에서는 시간 **6.368초**에 **최대 음의 반력 -146.7kN**이 발생함을 알 수 있습니다.

- 메모장 프로그램과 그래프 창을 닫습니다.

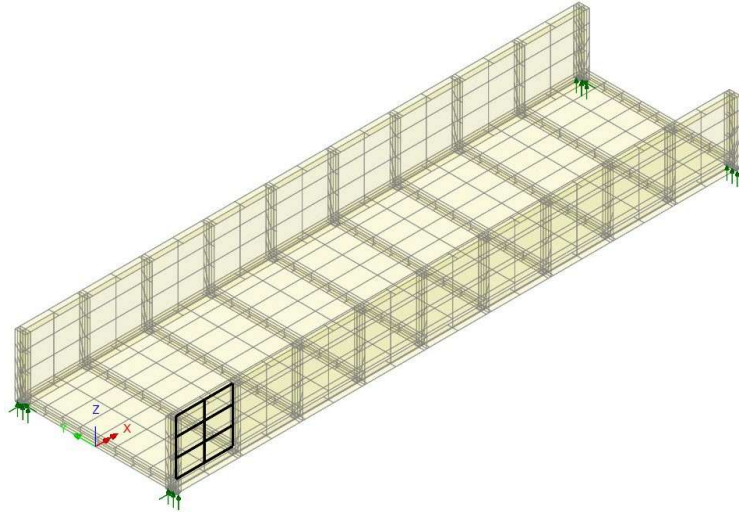
교량 구조물 측면 패널의 평균 및 최대 응력

마지막으로 교량 구조물 측면 패널의 평균 최대 및 전체 최대 면내 전단응력을 살펴봅니다.

- **Treeview> Layer** 탭에서 **Labels** 레이어 이름을 더블클릭합니다.

- **Properties** 대화상자에서 **Node / Name** 체크박스를 **선택 해제**하고 **Element / Name** 체크박스를 **선택**합니다. **OK** 버튼을 클릭합니다.

다음 그림과 같이 **Select Elements**  커서로 교량 구조물 측면 패널을 이루는 6개 요소를 선택합니다.



참고. IMDPlus 요소 집합에는 Thick Beam 요소, 연속체 요소, Thick Shell 요소와 같이 같은 종류의 요소만 사용할 수 있습니다. 다만 요소 집합에는 가우스점이나 절점 수가 서로 다른 요소가 포함될 수 있습니다.

Analyses> IMDPlus> Moving Load> Moving Load Analysis...

위의 메뉴를 실행하여, **IMDPlus Moving Load Analysis Control** 대화상자를 엽니다.

- **Next** 버튼을 클릭해 앞서 정의한 값을 적용합니다. 전체 질량 참여율에 대한 메시지가 표시되면 **Yes** 버튼을 클릭해 계속합니다.

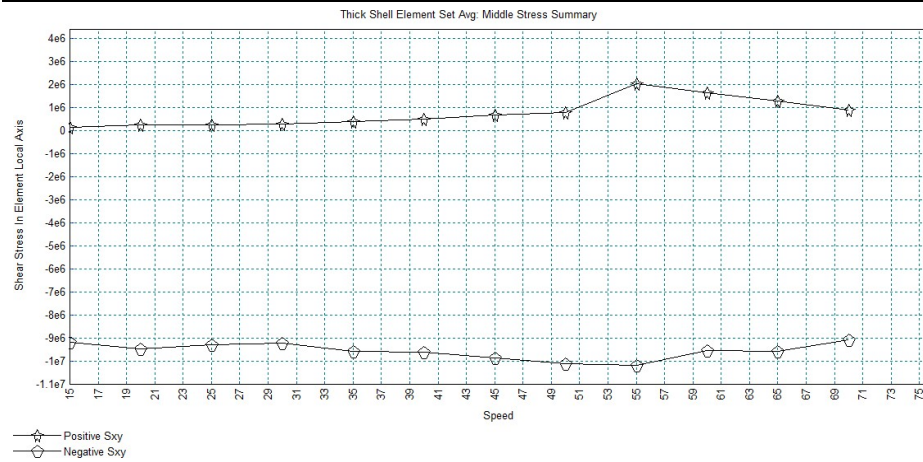
IMDPlus Output Control 대화상자에 다음 정보를 입력합니다.

- **Element**를 선택하고 드롭다운 목록에서 **Extent**를 **Selected**로 설정합니다. 이렇게 하면 앞 단계에서 선택한 교량 구조물의 요소 6개가 선택됩니다.
- 결과 항목으로 **Stress (middle) – Thick Shell**, 성분으로 **Sxy**를 선택합니다.
- **Sum of chosen items**를 선택 해제하고 **Average of chosen items**를 선택합니다.
- **Individual Items**가 계속 선택 해제되어 있는지 확인합니다.
- **Response time history**를 선택 해제합니다.
- **Peak response summary, Positive/negative, Envelope**가 모두 계속 선택되어 있는지 확인합니다.
- **Generate graphs in Modeller**가 계속 선택되어 있는지 확인합니다.

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

- **Finish** 버튼을 클릭해 요소 집합에 대한 해석을 수행합니다. 선택한 요소를 모두 처리할지 묻는 메시지가 표시되면 **Yes**를 클릭합니다.
- **IMDPlus**가 생성한 임시 파일을 삭제하여 디스크 공간을 확보할지 묻는 메시지가 표시되면 **Yes**를 클릭합니다.

다음 그림과 같은 그래프가 표시됩니다. 이는 교량 구조물 측면 패널의 평균 중앙면 전단응력 S_{xy} 의 최대 양·음 값을 나타냅니다.



관련 그래프 데이터 표를 보면, 가장 큰 양·음의 최대값은 속도 **55m/s**에서 발생하며 각각 **2.03MPa**, **-10.2MPa**입니다.

참고. Average of chosen items 옵션은 먼저 선택한 썩 쉘 요소들의 모든 가우스점 결과를 합산한 뒤, 이 합산 결과를 단순 평균하여 요소 평균 응답 시간이력을 구하고, 여기서 평균 최대값 결과를 얻습니다.

이동하중 속도별 요소 최대 응력 포락선이 메모장의 peak_stressSet1.sum 파일에 표시됩니다. 이는 선택한 요소들의 모든 개별 가우스점 결과를 검토해 얻은 최대 응력·단면력을 요약한 것입니다. 속도 55m/s에 대한 결과는 다음 그림과 같습니다.

IMDPlus를 이용한 열차 주행에 따른 교량의 진동 응답 해석

```
# +-----+
# | Speed = 55.000000000000 |
# +-----+
#
# Entity          Time          Value          Element      GP
Peak_Pos_Top_Sx   6.804000000    6187041.778     576           1
Peak_Neg_Top_Sx   6.981000000    -17621080.12    580           4
Peak_Pos_Top_Sy   6.812000000    3221800.463     576           1
Peak_Neg_Top_Sy   6.796000000    -5296186.790    575           4
Peak_Pos_Top_Sxy  7.224000000    2729271.153     576           3
Peak_Neg_Top_Sxy  6.806000000    -11777411.04    575           2
Peak_Pos_Top_Syz  6.814000000    0.3074647326E-024 575           1
Peak_Neg_Top_Syz  7.226000000    -0.5699439799E-025 575           1
Peak_Pos_Top_Szx  6.822000000    0.1184384610E-023 575           1
Peak_Neg_Top_Szx  4.657000000    -0.2941288177E-024 575           1
Peak_Pos_Mid_Sx   6.985000000    5642834.400     576           2
Peak_Neg_Mid_Sx   6.986000000    -16293797.61    580           4
Peak_Pos_Mid_Sy   6.980000000    3211042.810     576           2
Peak_Neg_Mid_Sy   6.795000000    -5487373.279    575           4
Peak_Pos_Mid_Sxy  7.224000000    2668771.837     576           2
Peak_Neg_Mid_Sxy  6.798000000    -13599451.44    576           2
Peak_Pos_Mid_Syz  0.135000000    233736.1969     576           2
Peak_Neg_Mid_Syz  6.914000000    -224229.0984     578           2
Peak_Pos_Mid_Szx  6.815000000    332154.0659     576           1
Peak_Neg_Mid_Szx  6.914000000    -326769.8170     576           1
Peak_Pos_Bot_Sx   6.980000000    6368749.644     576           2
Peak_Neg_Bot_Sx   6.803000000    -16530593.84    580           4
Peak_Pos_Bot_Sy   0.334000000    4184517.673     578           2
Peak_Neg_Bot_Sy   6.980000000    -5974317.435    575           4
Peak_Pos_Bot_Sxy  7.223000000    3122244.381     575           2
Peak_Neg_Bot_Sxy  6.800000000    -16184421.24    576           2
Peak_Pos_Bot_Syz  6.814000000    0.6235161937E-024 575           1
Peak_Neg_Bot_Syz  4.653000000    -0.1001601270E-024 575           1
Peak_Pos_Bot_Szx  6.781000000    0.6470585098E-024 575           1
Peak_Neg_Bot_Szx  7.210000000    -0.1744639957E-024 575           1
Peak_Pos_Nx       6.985000000    71663.99688     576           2
Peak_Neg_Nx       6.986000000    -206931.2296     580           4
Peak_Pos_Ny       6.980000000    40780.24369     576           2
Peak_Neg_Ny       6.795000000    -69689.64064     575           4
Peak_Pos_Nxy      7.224000000    33893.40233     576           2
Peak_Neg_Nxy      6.798000000    -172713.0333     576           2
Peak_Pos_Mx       7.011000000    92.34967314     578           1
Peak_Neg_Mx       6.908000000    -137.7246470     578           1
Peak_Pos_My       6.873000000    77.01443274     578           4
Peak_Neg_My       6.907000000    -101.0378914     578           1
Peak_Pos_Mxy      6.974000000    89.22790928     575           2
Peak_Neg_Mxy      6.905000000    -35.78935626     576           2
Peak_Pos_Sx       6.815000000    2812.237758     576           1
Peak_Neg_Sx       6.914000000    -2766.651117     576           1
Peak_Pos_Sy       0.135000000    1978.966467     576           2
Peak_Neg_Sy       6.914000000    -1898.473033     578           2
#
#
```

중앙면 면내 전단응력(Sxy)의 최대 양·음 값은 요소 576의 가우스점 2에서 발생하며, 각각 시간 7.224초에 2.67MPa, 시간 6.798초에 -13.6MPa가 관측됩니다.

- 메모장 프로그램과 그래프 창을 닫습니다.