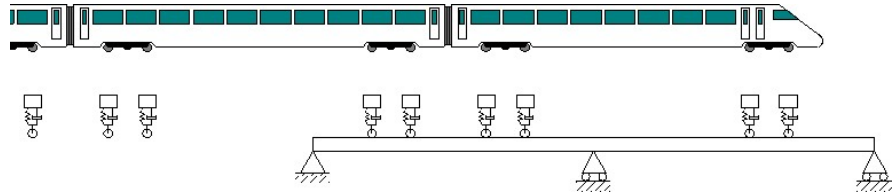


스프링 매스를 이용한 고속열차 모델링

LUSAS 버전:	23.0
소프트웨어 제품:	모든 Plus 버전
제품 옵션:	IMDPlus
참고: 이 예제는 LUSAS Teaching and Training Version으로 사용이 불가능합니다. 생성되는 해석 결과 파일을 위해 약 4 GB의 디스크 공간이 필요합니다.	

설명



본 예제에서는 Wang et al, Latin Journal of Solids and Structures 7 (2010) 논문을 기반으로 스프링 매스로 모델링된 중국 CRH 고속열차의 통과에 대한 2경간 연속보의 응답을 검토합니다.

전체적으로 N, m, kg, s, C 단위가 사용됩니다.

목적

해석의 출력 요구사항은 다음과 같습니다.

- 열차 속도 250 kph에 대한 두 경간의 중앙 연직 처짐 응답
- 25 kph 간격으로 25 kph에서 600 kph 사이의 열차 속도에 대한 Y방향 중앙 최대 연직 처짐
- 연속보의 첫 번째 공진 주파수를 가진 임계 속도인 열차 속도 300 kph에 대한 두 경간의 중앙 연직 처짐 응답
- 열차 속도 300 kph에 대한 첫 번째 및 마지막 스프링 매스 시스템의 차체 및 차륜의 변위 시간이력과 차체의 가속도 시간이력
- 25 kph에서 600 kph의 속도 범위에 걸친 모든 기관차 및 객차 차체의 최대 가속도 시간이력

키워드

2D Inplane, 이동 질량, 시간 영역, 응답, Interactive Modal Dynamics, IMD, IMDPlus, 고유값.

관련 파일

관련 파일은 LUSAS 웹사이트의 사용자 영역에서 다운로드할 수 있습니다.

□ **CRH_Train.lmd** 이 파일은 예제의 CRH 열차 정의를 포함하는 속성 라이브러리입니다.

□ **CRH_Wheelset_Positions.xls** 이 파일은 예제의 CRH 열차에 대한 차륜 위치와 스프링 매스 시스템 식별자를 포함하는 Microsoft Excel 스프레드시트입니다.

모델링

LUSAS Modeller 실행

LUSAS Modeller 실행 방법에 대한 자세한 내용은 Examples Manual Introduction의 **Running LUSAS Modeller** 항목을 참조하십시오.

참고. 본 예제는 새로운 LUSAS Modeller 세션이 시작되었다고 가정하고 작성되었습니다. 기존 Modeller 세션에서 계속 진행하는 경우 메뉴 명령 **File > New**를 선택하여 새 모델 파일을 시작합니다. Modeller는 저장되지 않은 데이터에 대해 메시지를 표시하고 New Model 대화 상자를 표시합니다.

새 모델 생성

- 파일 이름을 **IMDPlus CRH High Speed Train**으로 입력합니다.
- **User-defined**를 선택하고 Set 버튼을 눌러 새 폴더 위치를 지정합니다. \\Users\\<name>\\Documents\\LUSAS211\\Projects\\폴더로 이동하여 **Make New Folder** 버튼을 클릭하고 폴더 이름으로 **IMDPlus CRH Analysis**를 입력한 후 **OK** 버튼을 클릭합니다.

- Analysis type이 **Structural**로 설정되어 있는지 확인합니다.
- Analysis Category를 **2D Inplane**으로 선택합니다.
- Model units을 **N,m,kg,s,C**로 설정합니다.
- Timescale units을 **Seconds**로 그대로 둡니다.
- Startup template을 **None**으로 선택합니다.
- Layout grid가 **None**으로 설정되어 있는지 확인합니다.
- 제목을 **IMDPlus Sprung Mass Modelling of CRH High Speed Train**으로 입력합니다.
- OK 버튼을 클릭합니다.

모델 형상

Geometry > Line > by Coords...

(0, 0), (20,0), (40, 0)의 좌표를 입력하여 2경간 연속보를 나타내는 라인을 정의합니다.

이로써 열차가 통과하는 보의 형상이 완성됩니다. IMDPlus가 열차가 지나가는 경로를 정의하는 데 사용할 라인도 정의해야 합니다. 이 라인은 실제 구조물로 인식되지 않습니다.

(0, 10)과 (40, 10)의 좌표를 입력하여 열차의 경로를 나타내는, 2경간 연속보 위쪽의 라인을 정의합니다(선택의 편의를 위해 이 라인은 보 라인 위쪽에 정의되며, 열차 하중은 이 라인에서 구조물로 수직으로 투영됩니다).

요소 정의 및 적용

Attributes > Mesh > Line...

2경간 연속보를 나타내는 Line 객체는 2차원 보 요소를 사용하여 메쉬를 정의합니다.

- **Thick beam, Linear** 요소를 선택합니다.
- 분할 수를 **20**으로 설정합니다.
- 속성 이름을 **Thick Beam**으로 입력한 후 OK 버튼을 클릭합니다.
- 2경간 연속보를 정의하는 두 개의 라인을 선택합니다.
- 메쉬 속성 Thick Beam을 Treeview에서 선택된 모델 Line으로 드래그 앤 드롭합니다.

라인을 따라 40개의 BMI2 요소가 생성됩니다.

재료 특성 정의 및 적용

Attributes > Material > Material Library...

2경간 연속보를 나타내는 두 Line에 중국 국가표준 (China National Standard): Code for Design of Concrete Structures에 따라 C50 콘크리트를 할당합니다.

- Material Type에서 **Concrete**를 선택합니다.
- Country는 **China**를 선택합니다.
- Standard는 **GB 50010-2002**를 선택합니다.
- Grade는 **C50**을 선택합니다.
- 데이터셋명은 **Iso1**로 그대로 두고 **OK** 버튼을 클릭하여 재료를 정의합니다.
- 2경간 보를 정의하는 두 라인이 선택된 상태에서, 재료 특성 **Iso1 (C50 | Concrete | GB 50010-2002)**을 Treeview에서 선택된 모델 Line으로 드래그 앤 드롭합니다.

기하 특성 정의 및 적용

Attributes > Geometric > Line...

2경간 연속보를 나타내는 Line 피처에는 Wang et al 논문에서 사용된 물성치와 동등한 사용자 정의 단면이 할당됩니다. 이 논문에서 휨강성 EI 값 $2.5E10 \text{ N/m}^2$ 와 단위 길이당 질량 $3.4088E4 \text{ kg/m}$ 는 아래에 입력되는 물성치와 동일합니다.

- Definition에 **Enter Properties for 2D Thick Beam (Any beam)**으로 설정되어 있는지 확인합니다.
- Cross sectional area (A)를 **13.368**로 설정합니다.
- Second moment of area about z axis (Izz)를 **0.724638**로 설정합니다.
- Effective shear area in y direction (Asy)를 **13.368E3**으로 설정합니다.
- Eccentricity in y direction (ey)가 **0.0**으로 설정되어 있는지 확인합니다.
- 속성 이름을 **Cross-Section**으로 입력하고 OK를 클릭합니다.
- 2경간 보를 정의하는 라인이 선택된 상태에서, 지오메트릭 속성 Cross-Section을 Treeview에서 선택된 모델 Line으로 드래그 앤 드롭합니다.

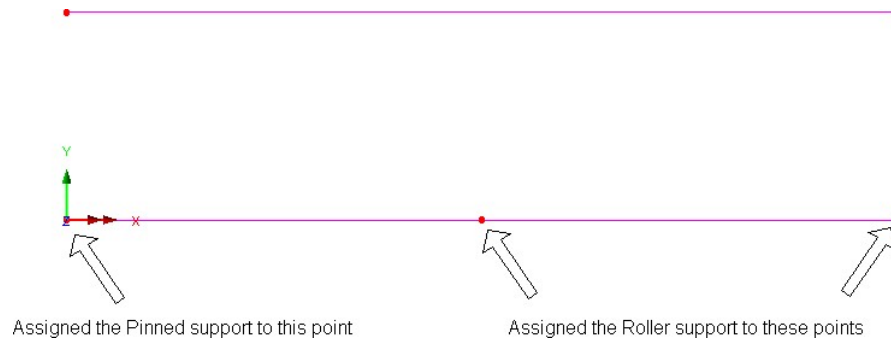
참고. 유효전단면적은 보의 계산에서 전단변형을 실질적으로 제거하기 위해 단면적의 1000배로 설정되었습니다. 해당 논문에서는 전단변형을 고려하지 않는 Bernoulli-Euler 보를 사용합니다.

지점조건

연속보는 좌측 끝단에서 힌지 지점(pinned support)으로 지지되고, 보의 중앙 및 우측 끝단에서는 롤러 지점(roller support)으로 지지됩니다.

- Translation in X를 **Fixed**로 설정합니다.
- Translation in Y를 **Fixed**로 설정합니다.
- 속성 이름을 **Pinned**로 입력하고 Apply를 클릭합니다.
- Translation in X를 **Free**로 설정합니다.

- Translation in Y를 Fixed로 그대로 둡니다.
- 속성 이름을 **Roller**로 입력하고 OK를 클릭합니다.
- 아래에 표시된 대로 좌측 점에는 Pinned 지점을, 모델의 나머지 두 점에는 Roller 지점을 할당하고, Assign Support 대화 상자가 나타나면 OK를 클릭하여 기본값을 적용합니다.



하중 정의 및 적용

Attributes > Loading...

IMDPlus 이동 질량 해석을 수행하기 위해서는 보에 대한 스프링 매스 시스템의 작용을 나타내는 단위 하중을 모델에 포함시켜야 하며, 이를 통해 모달 힘을 계산하기 위해 보를 따라 이동시킬 수 있습니다.

- 뷰 창의 빈 공간에서 마우스 왼쪽 버튼을 클릭하여 선택된 모든 항목을 해제합니다.
- Structural Loading 대화 상자의 Load type 섹션에서 **Discrete loads** 옵션을 선택한 후, 다음 패널에서 **Discrete point array**를 선택하고 Next 버튼을 클릭합니다.
- Point 대화 상자에서 다음 사항을 확인합니다.

Arbitrary가 선택되어 있습니다.

- Untransformed load direction이 Y로 설정되어 있는지 확인합니다.
- **Project in load direction**이 선택되어 있는지 확인합니다.
- X를 0, Y를 0, Z를 0으로 설정하고 Load를 -1로 설정하여 전체 Y축 방향으로 아래쪽으로 작용하도록 그리드에 단일 하중을 입력합니다.
- 속성 이름을 **Unit Wheelset Load**로 입력하고 Finish를 클릭합니다.

Search Area

단일 휠셋을 나타내는 이산 하중이 구조물을 따라 이동할 때는 **Search Area**를 사용하여 이 하중의 작용을 모델에 대해 지정하는 것이 가장 바람직합니다.

- 속성 이름을 **Continuous Beam**으로 설정하고 OK를 클릭합니다.
- 2경간 연속보를 정의하는 라인을 선택합니다.
- 검색 영역 속성 Continuous Beam을 Treeview에서 선택된 모델 라인으로 드래그 앤 드롭합니다.
- 뷰 창의 빈 공간에서 마우스 왼쪽 버튼을 클릭하여 선택된 모든 항목을 해제합니다.

고유값 제어 정의

고유값 제어(Eigenvalue controls)는 하중 케이스(loadcase)의 속성으로 정의됩니다.

- Treeview에서 Analysis 1을 확장한 후 Loadcase 1을 마우스 오른쪽 버튼으로 클릭하고 Controls 메뉴에서 **Eigenvalue**를 선택합니다.

Eigenvalue 대화 상자가 나타나면, 다음 매개변수를 지정해야 합니다.

The dialog box 'Eigenvalue' contains the following settings:

- Solution:** Frequency
- Include modal damping:** ☐ (Set damping... button is disabled)
- Eigenvalues required:** Range
- Range specified as:** ☒ Frequency, ☐ Eigenvalue
- Eigenvector normalisation:** ☐ Unity, ☒ Mass, ☐ Stiffness
- Convert assigned loading to mass:** ☐
- Type of eigensolver:** Default
- Sturm sequence check for missing eigenvalues:** ☒

	Value
Minimum frequency	0
Maximum frequency	50
Number of eigenvalues	0

Buttons: OK, Cancel, Help, Advanced...

- Solution이 **Frequency**로 설정되어 있는지 확인합니다.
- Eigenvalues required를 **Range**로 설정합니다.
- Range specified as가 **Frequency**로 설정되어 있는지 확인합니다.
- Minimum frequency를 0으로 설정합니다.
- Maximum frequency를 **50**으로 설정합니다.
- 범위 내 모든 모드를 해석하기 위해 Number of eigenvalues를 0으로 설정합니다.
- Type of eigensolver가 **Default**로 설정되어 있는지 확인합니다.

참고. Eigenvalue normalisation은 기본적으로 **Mass**로 설정됩니다. 이는 고유벡터를 이후의 IMD 해석에 사용하려는 경우 필수적입니다.

- OK 버튼을 클릭하여 완료합니다. 모델 파일을 저장합니다.

해석 실행

- 모델이 로드된 상태에서 Solve 버튼을 클릭하면 Solve Now 대화 상자가 표시됩니다.
- OK 버튼을 클릭하여 해석을 실행합니다.

모델 정보로부터 LUSAS Datafile이 생성됩니다. LUSAS Solver는 이 데이터 파일을 사용하여 해석을 수행합니다.

해석 결과 확인

해석이 LUSAS Modeller 내에서 실행된 경우, 해석 결과는 현재 모델 위에 로드되며 각 고유값에 대한 하중 케이스 결과는 Treeview에서 확인할 수 있습니다. 모드 1 주파수 결과가 기본적으로 활성화되도록 설정됩니다.



주파수 확인

Wang et al 논문에는 처음 두 개의 주파수만 제시되어 있지만, 나머지 연직 주파수는 논문의 방정식으로부터 계산할 수 있습니다. Bernoulli-Euler 보의 50 Hz 이하 연직 모드에 대한 이러한 주파수는 아래에 나열되어 있습니다.

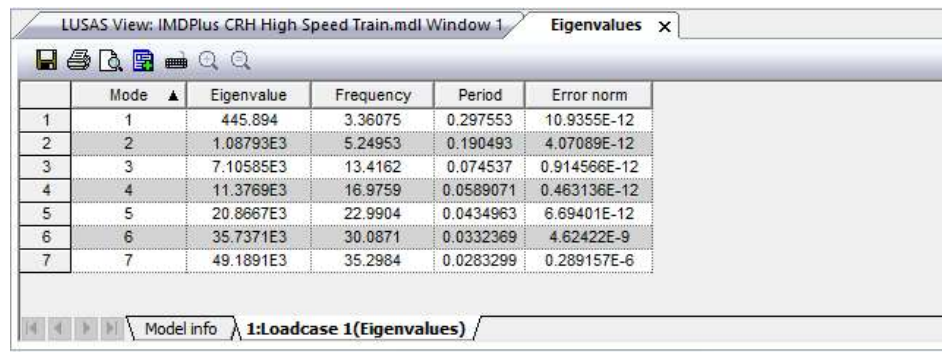
$f_1 = 3.363 \text{ Hz}$, $f_2 = 5.255 \text{ Hz}$, $f_3 = 13.452 \text{ Hz}$, $f_4 = 17.025 \text{ Hz}$, $f_5 = 30.267 \text{ Hz}$,

$f_6 = 35.522 \text{ Hz}$

해석으로부터 얻은 주파수는 **Print Results Wizard**에서 확인할 수 있습니다.

- **results type Eigenvalues**가 선택되어 있는지 확인합니다. loadcase 1에 대해 available results 패널에서 **Eigenvalues (Frequency)**를 선택하고 OK를 클릭합니다. 고유값/주파수 결과가 표시되며 Utilities treeview에 Print Results Wizard 항목이 추가됩니다.

LUSAS가 0에서 50 Hz 범위에서 7개의 진동 모드를 얻었음을 확인할 수 있습니다. 위에 나열된 Bernoulli-Euler 보의 모든 진동 모드는 근접하게 일치하지만, 논문에서 다루지 않은 21.28 Hz의 모드 5라는 추가 진동 모드가 존재합니다. 이는 아래에서 Wang et al이 고려하지 않은 수평 진동 모드임이 확인될 것입니다.



	Mode ▲	Eigenvalue	Frequency	Period	Error norm
1	1	445.894	3.36075	0.297553	10.9355E-12
2	2	1.08793E3	5.24953	0.190493	4.07089E-12
3	3	7.10585E3	13.4162	0.074537	0.914566E-12
4	4	11.3769E3	16.9759	0.0589071	0.463136E-12
5	5	20.8667E3	22.9904	0.0434963	6.69401E-12
6	6	35.7371E3	30.0871	0.0332369	4.62422E-9
7	7	49.1891E3	35.2984	0.0283299	0.289157E-6

질량 참여 계수 확인 (Mass Participation Factor)

참고. 성공적인 IMDPlus 해석을 수행하기 위해서는 전체 질량 중 상당 부분이 해석에 반영되었는지 확인해야 합니다. 이상적으로는 전체 방향에 대해 전체 질량의 약 90%가 달성되었는지 확인해야 합니다. 90% 미만이 달성된 경우라도, 누락된 진동 모드가 동적 입력에 의해 가진될 수 없거나 구조물의 상당 부분이 해당 방향으로 지점에 의해 구속되어 진동 모드에 참여할 수 없는 경우에는 추가 모드를 포함할 필요가 없습니다. 포함된 진동 모드의 적정성은 해석마다 다르지만, 전체 질량 중 상당 부분이 반영되었는지 확인하지 않으면 중요한 모드가 누락되어 이후 해석 결과에

오류가 발생할 수 있습니다.

참고. 모드는 질량 참여 계수가 낮더라도 해석에서 중요한 의미를 가질 수 있으므로 모드 형상도 함께 확인해야 합니다. 이는 모드 형상에서 동일한 질량이 서로 반대 방향으로 움직이는 '대칭 모드(symmetrical modes)'에서 자주 발생합니다. 본 해석의 첫 번째 모드가 이러한 경우에 해당하며, 이는 한쪽 경간이 위로 움직이고 동일한 길이와 질량을 가진 다른 경간이 아래로 움직이는 단순한 사인파 형상입니다. 이 모드는 Y방향 질량 참여 계수가 0이지만 해석에서 중요한 모드입니다(예제 뒷부분에서 다루는 열차 속도에 대한 보의 공진을 참조하십시오). 따라서 진동 모드의 중요성을 평가하기 위해서는 어느 정도의 엔지니어링 판단이 필요하며, 이는 해석에 포함된 질량 참여도 합계에 대한 단순한 확인과 함께 활용되어야 합니다.

- **results type Eigenvalues**가 선택되어 있는지 확인합니다. loadcase 1에 대해 available results 패널에서 **Eigenvalues (Frequency)**를 선택 해제한 후 **Sum mass participation factors**를 선택하고 OK를 클릭합니다. Sum Mass Participation Factors 결과가 표시되며 Utilities treeview에 또 다른 Print Results Wizard 항목이 추가됩니다.

X방향과 Y방향 모두에서 90% 값이 거의 달성되었음을 확인할 수 있으며, 이는 아래 참고 사항에서 설명합니다.

Mode	Sum Mass X	Sum Mass Y	Sum Mass Z	Sum Mass THX	Sum Mass THY	Sum Mass THZ	Frequency	Period
1	3.78641E-33	36.2317E-27	0.0	0.0	0.0	20.1168E-36	3.39419	0.294621
2	8.84706E-33	0.738434	0.0	0.0	0.0	40.4445E-33	5.30177	0.186616
3	8.8668E-33	0.738434	0.0	0.0	0.0	40.4474E-33	13.5497	0.0738026
4	19.314E-33	0.745294	0.0	0.0	0.0	40.8769E-33	17.1448	0.0583267
5	0.810569	0.745294	0.0	0.0	0.0	40.8791E-33	23.2192	0.0430678
6	0.810569	0.745294	0.0	0.0	0.0	42.3981E-33	30.3864	0.0329094
7	0.810569	0.856006	0.0	0.0	0.0	6.99438E-30	35.6496	0.0280508

Mode	Sum Mass X	Sum Mass Y	Sum Mass Z	Sum Mass THX	Sum Mass THY	Sum Mass THZ	Frequency	Period
1	3.0292E-33	20.7196E-27	0.0	0.0	0.0	0.211059E-36	3.36075	0.297553
2	4.3751E-33	0.738434	0.0	0.0	0.0	44.9196E-33	5.24953	0.190493
3	4.82449E-33	0.738434	0.0	0.0	0.0	44.922E-33	13.4162	0.074537
4	9.16449E-33	0.745294	0.0	0.0	0.0	45.2411E-33	16.9759	0.0589071
5	0.810569	0.745294	0.0	0.0	0.0	45.2412E-33	22.9904	0.0434963
6	0.810569	0.745294	0.0	0.0	0.0	46.9762E-33	30.0871	0.0332369
7	0.810569	0.856006	0.0	0.0	0.0	7.1068E-30	35.2984	0.0283299

참고. 본 해석에서는 50 Hz 이하 주파수를 갖는 처음 7개의 진동 모드만 포함합니다. 이 7개 모드에는 Wang et al이 고려한 6개의 연직 모드와, X방향으로 81.06%의 질량 참여율을 갖는 추가적인 수평 모드인 모드 5가 포함됩니다. 7개보다 많은 진동 모드를 포함하면 질량 참여도 합계가 모든 방향에서 90%에 근접하게 됩니다(0에서 100 Hz까지 해석하면 12개의 진동 모드가 얻어지며, 이는 X방향으로 90.06%, Y방향으로 89.97%를 제공하지만, 이러한 고차 모드는 열차의 통과에 의해 가진되지 않을 수 있으며 구조물의 진동 응답에 크게 기여하지 않을 수 있습니다).

- 결과 창을 닫습니다.

참고. 이후 예제 진행 시 IMDPlus의 사용을 간편하게 하기 위해(그리고 **Analyses > IMDPlus** 메뉴 항목에서 IMDPlus 메뉴를 선택하는 것에 대한 대안을 제공하기 위해) LUSAS Modeller에서 IMDPlus 툴바를 활성화하는 것을 권장합니다.

- **View > Toolbars...** 메뉴 명령을 선택하고, Toolbars 탭을 선택한 후, 목록에서 **IMDPlus** 옵션을 활성화하고 **Close**를 클릭합니다.
- IMDPlus 툴바가 활성화된 경우, 툴바에서 Moving Mass analysis 버튼 을 클릭하여 이동 질량 해석을 선택하고 대화 상자에 대한 도구 버튼 바로가기를 활성화합니다.

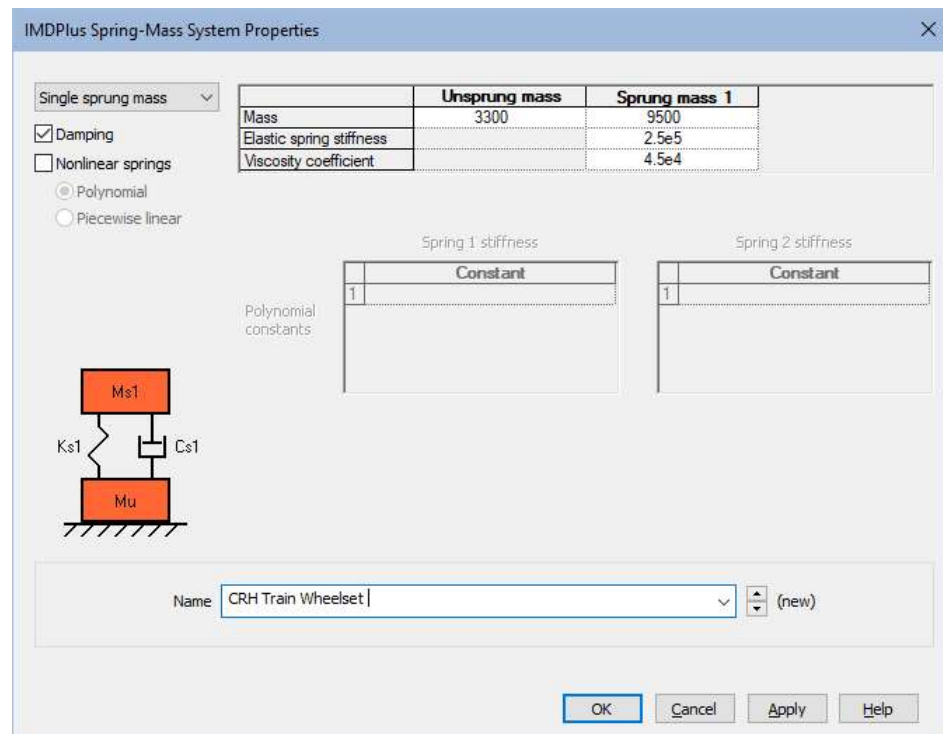
CRH 열차 편성 정의

해석을 수행하기 전에 LUSAS Modeller에서 중국 CRH 고속열차의 스프링 매스 표현을 정의해야 합니다. 이는 다음과 같은 2단계 과정입니다.

1. 휠셋/보기/차체에 대한 개별 스프링 매스 정의가 필요하며,
2. 전체 열차 편성 구성이 정의됩니다.

본 해석에는 논문에서 제시된 스프링 매스 표현이 사용되며, 이는 열차 편성의 모든 휠셋에 사용되는 단일 스프링 매스 정의만을 포함합니다.

- 메뉴를 통해 IMDPlus Spring-Mass System Properties 대화 상자를 열거나 툴바의  버튼을 클릭합니다. CRH 열차의 휠셋/차체는 휠셋을 비스프링 질량(unsprung mass)으로, 차체를 첫 번째 스프링 매스로 하여 정의됩니다.



- 드롭다운 목록에서 **Single sprung mass**를 선택합니다.

- **Damping**이 선택되어 있는지 확인합니다.
- Unsprung mass의 Mass를 **3300**으로 입력합니다
- Sprung mass 1의 Mass를 **9500**으로 입력합니다
- Sprung mass 1의 Elastic spring stiffness를 **2.5E5**로 입력합니다
- Sprung mass 1의 Viscosity coefficient를 **4.5E4**로 입력합니다
- Name을 **CRH Train Wheelset**으로 입력합니다
- OK 버튼을 클릭합니다.

논문에 소개된 중국 CRH 열차 편성은 총 8량으로 구성됩니다. 발표된 논문에 제시된 치수를 사용하여, 전체 열차 편성을 정의하기 위해 다음의 스프링-질량 시스템 값이 필요합니다.

차량	이전 차축으로부터의 거리 (m)	열차 앞부분으로부터의 거리 (m)
기관차	0	0.0
기관차	2.5	-2.5
기관차	15	-17.5
기관차	2.5	-20.0
객차 1	5	-25.0
객차 1	2.5	-27.5
객차 1	15	-42.5
객차 1	2.5	-45.0
객차 2	5	-50.0
객차 2	2.5	-52.5
객차 2	15	-67.5
객차 2	2.5	-70.0
객차 3	5	-75.0
객차 3	2.5	-77.5
객차 3	15	-92.5
객차 3	2.5	-95.0
객차 4	5	-100.0
객차 4	2.5	-102.5
객차 4	15	-117.5
객차 4	2.5	-120.0
객차 5	5	-125.0
객차 5	2.5	-127.5

객차 5	15	-142.5
객차 5	2.5	-145.0
객차 6	5	-150.0
객차 6	2.5	-152.5
객차 6	15	-167.5
객차 6	2.5	-170.0
기관차	5	-175.0
기관차	2.5	-177.5
기관차	15	-192.5
기관차	2.5	-195.0

- 메뉴를 통해 IMDPlus Moving Mass Vehicle Configuration 대화 상자를 열거나 툴바의  버튼을 클릭합니다.

이제 위 표의 Distance from front of train 값과 스프링-질량 시스템을 사용하여 이동 질량 차량(moving mass vehicle)이 정의됩니다. 차량 정의를 간단하게 하기 위해, 스프링-질량 시스템의 위치와 식별자는 Microsoft Excel 스프레드시트에 포함되어 있어 대화 상자에 복사하여 붙여넣을 수 있습니다.

- 다운로드된 **CRH_Wheelset_Positions.xls spreadsheet** 파일을 찾아 엽니다.
 - 첫 번째와 두 번째 열에 있는 32개의 위치 및 스프링-질량 시스템 식별자를 모두 선택하고 Ctrl+C를 사용하여 클립보드에 복사합니다
 - 대화 상자에 있는 그리드의 Position 및 Spring-mass system 헤더를 모두 선택하고 Ctrl+V를 사용하여 그리드에 붙여넣습니다
 - Name을 **CRH Train**으로 입력합니다
- 완료되면 대화 상자가 그림과 같이 표시되어야 합니다.
- 차량 구성(vehicle configuration)을 생성하려면 OK를 클릭합니다.

참고. 이 방법 대신, 표의 각 Position을 수동으로 입력하고 각 wheelset/body 위치에 연관된 Spring-mass system을 사용 가능한 스프링-질량 시스템 속성(property attribute)이 포함된 드롭다운 목록에서 선택할 수도 있습니다.

참고. 열차 편성 전체가 구조물을 통과하도록 하기 위해 wheelset의 위치는 음수 값으로 정의되며(또한 그렇게 정의되어야 합니다), 음수 값은 위치가 0인 열차 앞부분보다 뒤쪽에 wheelset을 배치합니다. 열차 앞부분의 이동은 경로의 시작부터 끝까지 계산되며, 음수 위치를 갖는 모든 wheelset이 경로를 따라 통과할 수 있도록 IMDPlus 솔루션에 추가 시간이 포함됩니다.

wheelset이 양수 값으로 정의된 경우, 이는 이미 열차 편성 정의에서 입력한 위치에 해당하는 경로상의 거리가 됩니다. 이를 고려하여 경로의 시작 부분이 정의되지 않은 경우, 양수 위치를 갖는 이러한 wheelset은 IMDPlus 해석 시작 시점에 이미 구조물 위에 위치해 있을 수 있습니다. 양수 위치를 사용하는 경우에는, 열차 전체가 구조물로 올바르게 진입하는 과정을 모델링할 수 있도록 경로의 시작 부분을 정의하는 라인이 충분한 추가 길이를 확보하도록 항상 확인해야 합니다.

참고. 열차 편성 또는 차량이 정의되면 라이브러리에 저장할 수 있으며, 이를 통해 위의 모든 정의 과정을 다시 거치지 않고도 이후 해석에서 가져와 사용할 수 있습니다. 이는 **File > Import/Export Model Data...** 메뉴 명령을 통해 접근하는 Library Browser를 통해 수행됩니다.

Importing a Vehicle

시간이 오래 걸리거나 예제 후반부에 제시된 것과 동일한 결과를 얻지 못하는 경우, 스프링-매스 시스템과 차량 정의를 원하는 폴더에 다운로드한 파일로 제공되는 라이브러리에서 가져올 수 있습니다.

- ❑ CRH Train.lmd 파일에는 이 예제의 차량 라이브러리가 포함되어 있습니다.

File
Import/Export Model
Data...

- Import from library to model 옵션을 선택합니다.
- Choose file... 버튼을 클릭하고 원하는 폴더에 다운로드한 CRH Train.lmd 파일을 찾아 선택합니다.
- 트리에서 IMDPlus (2) 항목을 선택합니다.
- OK 버튼을 클릭합니다.

IMDPlus 유틸리티의 저장

스프링-질량 시스템과 차량 속성(vehicle attribute)이 정의되면 Utilities Treeview에 표시됩니다.

참고. 스프링-질량 시스템 또는 차량 속성을 편집해야 하는 경우, 속성 이름에서 마우스 왼쪽 버튼으로 더블클릭하거나 마우스 오른쪽 버튼을 클릭하여 Edit Attribute...를 선택하면 원래의 대화 상자를 표시할 수 있습니다.

이동 질량 해석(Moving Mass Analysis)

이동 질량(moving mass) 계산은 IMDPlus(Interactive Modal Dynamics) 기능을 사용하여 수행됩니다. 구조물을 통과하는 열차의 이동 질량 해석을 수행하기 위해서는 다음의 세 단계를 거쳐야 합니다.

1. 이산 점하중(discrete point load) 또는 패치 하중(patch load)으로 정의된 단위 하중을 사용하여 스프링-질량 시스템이 이동할 경로를 정의하고 설정합니다. 이 예제에서는 단위 wheelset 하중이 Unit Wheelset Load라는 이름의 연직 방향으로 작용하는 이산 점하중으로 이미 정의되어 있습니다
2. 이 경로를 따르는 하중을 단위 하중으로부터 모달 하중(modal force)으로 변환하여 IMDPlus 이동 질량 해석에 적용함으로써, 스프링-질량 시스템이 구조물의 응답에 미치는 동적 영향을 계산합니다
3. IMDPlus 이동 질량 해석을 실행하여 구조물과 스프링-질량 시스템의 응답을 계산합니다

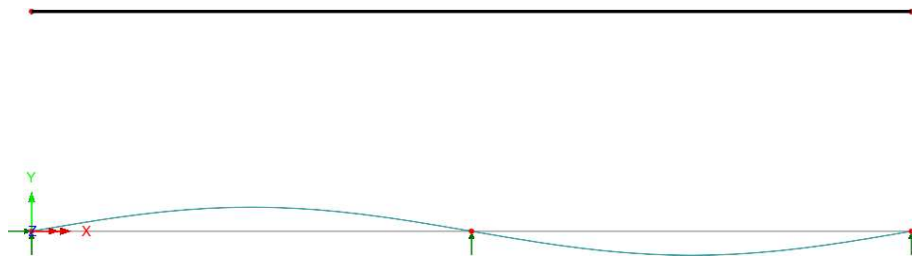
참고. 이 과정은 IMDPlus 이동 하중 해석(moving load analysis) 절차와 유사하지만, 열차 편성/차량이 일정한 하중이 아닌 스프링-질량 시스템으로 정의된다는 점이 다릅니다.

이동 질량 경로(Moving Mass Path)의 정의

구조물을 통과하는 CRH 열차의 주행을 해석하기 위해서는 이동 질량의 경로를 정의해야 합니다. Line 3(이동 질량의 경로를 나타내는 라인)이 현재 선택 항목으로 설정됩니다.

전체 모델이 표시되도록 하려면 다음과 같이 합니다.

- Treeview에서 그룹 이름 IMDPlus CRH High Speed Train.mdl 위에서 마우스 오른쪽 버튼을 클릭하고 드롭다운 메뉴에서 Visible 옵션을 선택합니다.
- Treeview에서 Geometry 레이어가 켜져 있는지 확인합니다.
- 그림에 표시된 라인(line 3)을 선택합니다



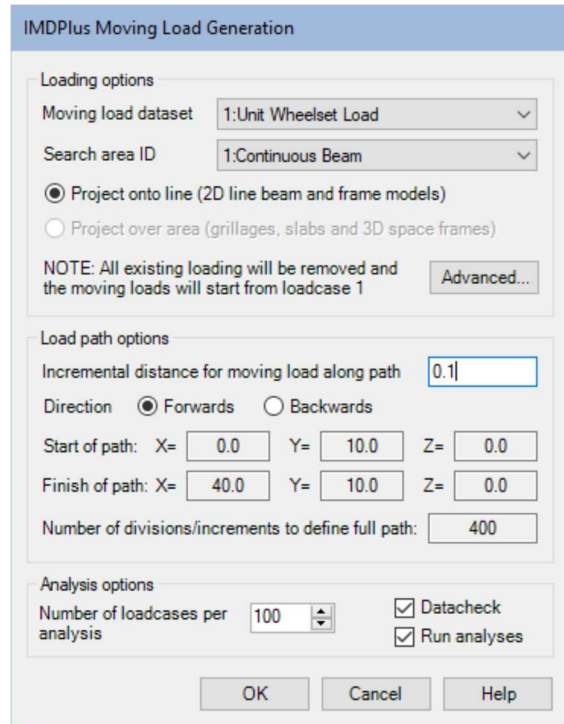
참고. 경로는 여러 개의 라인과 호(arc)로 정의할 수 있지만, 이들은 분기 없이 하나의 연속된 경로를 이루어야 합니다.

- 메뉴를 통해 IMDPlus Moving Load Generation 대화 상자를 열거나 툴바의  버튼을 클릭합니다.

IMDPlus Moving Load Generation 대화 상자가 시작되면, 현재 선택 항목으로 정의된 경로에 대한 정보와 함께 유효한 모든 이산 하중(discrete load) 및 검색

영역(search area)이 로딩 옵션에 표시됩니다.

이 예제에서는 열차의 단일 wheelset으로부터 발생하는 단위 하중을 정의하는 Unit Wheelset Load라는 이름의 단일 이산 하중이, 교량 구조물에 지정된 검색 영역과 함께 존재합니다.



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'. In the 'Loading options' section, 'Moving load dataset' is set to '1:Unit Wheelset Load' and 'Search area ID' is set to '1:Continuous Beam'. The 'Project onto line (2D line beam and frame models)' radio button is selected. A note states: 'NOTE: All existing loading will be removed and the moving loads will start from loadcase 1'. In the 'Load path options' section, 'Incremental distance for moving load along path' is 0.1, 'Direction' is 'Forwards', and the path coordinates are X=0.0, Y=10.0, Z=0.0 for the start and X=40.0, Y=10.0, Z=0.0 for the finish. The 'Number of divisions/increments to define full path' is 400. In the 'Analysis options' section, 'Number of loadcases per analysis' is 100, and both 'Datacheck' and 'Run analyses' are checked. At the bottom are 'OK', 'Cancel', and 'Help' buttons.

- Moving load dataset 목록에서 **1:Unit Wheelset Load**가 선택되어 있는지 확인합니다.
- 이산 하중의 지정을 위한 Search area ID에서 **1:Continuous Beam**이 선택되어 있는지 확인합니다.
- **Project onto line**이 선택되어 있는지 확인합니다(이 해석은 2D이므로 이것이 유일한 옵션이어야 합니다).
- 하중 특성의 포함 여부를 조정하려면 **Advanced** 버튼을 클릭합니다. **Moving Load Advanced Options** 대화 상자에서 검색 영역 밖의 하중에 대해 **Exclude all load** 옵션을 선택하고, load factor가 1.0인지 확인한 다음 OK 버튼을

클릭합니다.

- IMDPlus Moving Load Generation 대화 상자에서 Incremental distance를 **0.1**로 설정합니다

참고. 검색 영역(search area)을 사용하면 Modeller Reference Manual에 설명된 대로 필요한 피처(feature)에만 하중이 적용되도록 대상을 지정할 수 있습니다.

참고. 기본적으로 incremental distance는 하중이 이동하는 라인 길이의 10분의 1로 설정됩니다.

- 다른 모든 설정은 기본값 그대로 두고 OK 버튼을 클릭하여 진행한 다음, 현재 모델을 저장하려면 **Yes**를 선택합니다.

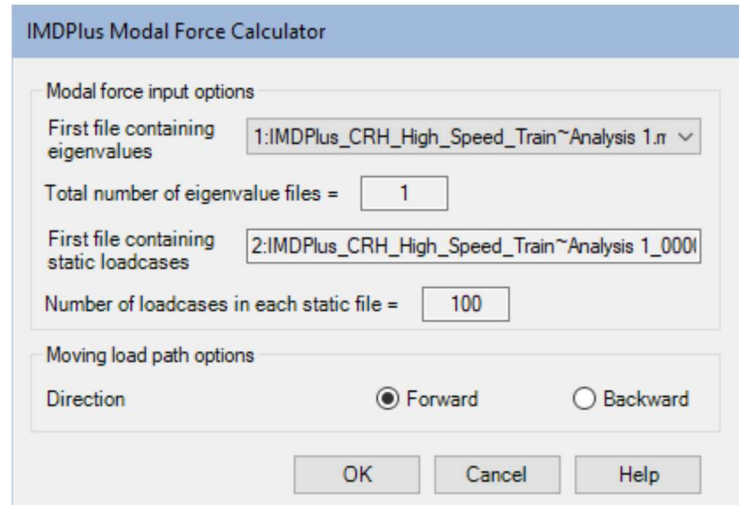
이제 프로그램은 경로를 따라 단위 wheelset의 401개 위치에 대한 하중 정보를 생성한 후 제어권을 LUSAS Modeller로 반환합니다.

참고. 이 대화 상자에서 정의된 이산 하중 위치는 각각 최대 100개의 하중 조건(loadcase)을 갖는 5개의 데이터 파일로 표로 정리되며, 해석은 자동으로 수행됩니다. 이러한 해석에는 원래 모델과 동일한 파일 기본 이름에 숫자 표시자가 추가된 이름이 사용됩니다(예: _00001, _00002 등). 이는 모달 하중 계산 단계에 필요합니다.

이동 질량에 대한 모달 하중 이력(Modal Force History)의 생성

Attributes > Loading...

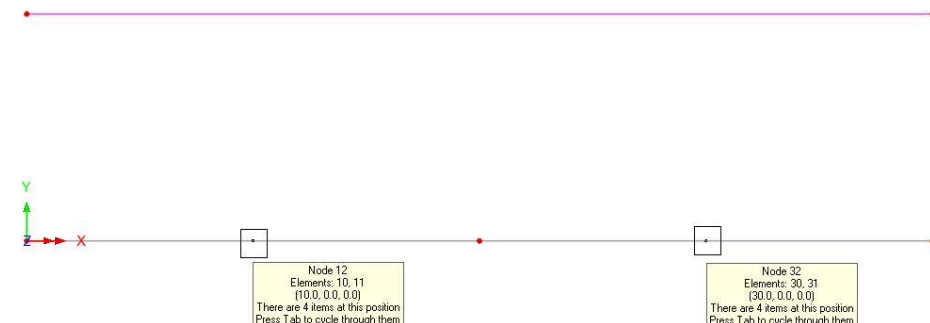
이전 단계에서는 구조물을 통과하는 단위 열차 wheelset의 주행이 정의되었습니다. 이제 Modal Force Calculator를 사용하여 IMDPlus 솔루션에 필요한 모달 하중을 계산해야 합니다.



- 메뉴를 통해 IMDPlus Modal Force Calculator 대화 상자를 열거나 툴바의  버튼을 클릭합니다.
- 기본 정보를 수락하고 진행하려면 OK 버튼을 클릭합니다.

출력 절점(Output Node)의 확인

이 예제에서는 모든 출력이 2경간 연속보(two-span continuous beam) 모델의 중앙 지간(mid-span)과 관련됩니다. 모델이 동일하다면 아래에 표시된 것처럼 이 절점 번호는 첫 번째 지간의 경우 **node 12**, 두 번째 지간의 경우 **node 32**가 되어야 합니다. 이 절점은 'N' 키를 누른 상태로 박스 선택(box-select)한 다음 선택 항목 위에 마우스를 올려놓으면 표시할 수 있습니다. 이 절점 번호는 이후 IMDPlus 대화 상자에 입력됩니다.



이동 질량 매개변수(Moving Mass Parameter)의 정의

이제 IMDPlus 해석을 위한 기본적인 이동 질량 정보가 모두 정의되었습니다. 다음 단계는 포함할 모드(mode), 감쇠(damping) 및 속도 매개변수를 정의하는 것입니다.

The image shows the 'IMDPlus Moving Mass Analysis Control' dialog box. It is divided into several sections:

- Moving mass input:** 'Vehicle configuration' is set to '1:CRH train'. There is a checkbox for 'Path surface profile' and a 'Browse...' button.
- Mode/damping control:** 'Included modes' is set to 'All'. 'Default damping' is checked and set to '2.5 %'. To the right, 'Total participating mass' is shown for X-Direction (81.05 %), Y-Direction (85.60 %), and Z-Direction (0.00 %).
- Solution control:** Contains 'Advanced solution options' and 'Path surface profile options', both with 'Modify...' buttons.
- Speed parameters:** 'Minimum speed' and 'Maximum speed' are both set to '69.44'. 'Speed increment' is empty.
- Time parameters:** 'Quiet time after passage of load' is set to '5'. 'IMDPlus automatic time step (Nyquist)' is unchecked. 'Solution time step' is set to '2e-3'.

At the bottom, there are buttons for '< Back', 'Next >', 'Cancel', and 'Help'.

- 메뉴를 통해 IMDPlus Moving Mass Analysis Control 대화 상자를 열거나 툴바의  버튼을 클릭합니다.
- **Vehicle configuration**에 **1:CRH Train**이 포함되어 있는지 확인합니다
- **Path surface profile**이 선택되어 있지 않은지 확인합니다.
- Included modes가 **All**로 설정되어 있는지 확인합니다. 그렇지 않은 경우 Modify... 버튼을 클릭하여 All modes 옵션이 선택되어 있는지 확인합니다.
- Default damping을 변경하려면 Modify... 버튼을 클릭합니다. 기본 감쇠비로 **2.5**를 입력하고 OK 버튼을 클릭합니다.
- Solution control 섹션에서 고급 솔루션 옵션을 변경하려면 Modify... 버튼을

클릭합니다. 기본 옵션을 설정하려면 Defaults 버튼을 클릭하고 OK 버튼을 클릭합니다.

- 250 kph에 해당하는 69.44 m/s의 단일 속도를 해석하기 위해 Minimum Speed를 69.44, Maximum Speed를 69.44, Speed Increment를 0으로 입력합니다.
- Quiet time after passage of load를 5로 입력합니다
- 필요한 시간 간격(time step)을 직접 지정할 수 있도록 IMDPlus automatic time step (Nyquist) 옵션을 선택 해제합니다.
- Solution time step을 **2E-3**으로 입력합니다
- 진행하려면 Next 버튼을 클릭합니다. 질량 참여 계수(mass participation factor)가 90% 미만이어서 총 질량이 부족하다는 메시지가 표시되면 **Yes**를 선택하여 계속 진행합니다. 이 해석에서는 처음 7개 모드(0~50 Hz)까지의 진동 모드 기여만을 고려하므로, 총 질량 90% 목표는 달성되지 않습니다.

IMDPlus Moving Mass Output Control 대화 상자가 표시됩니다.

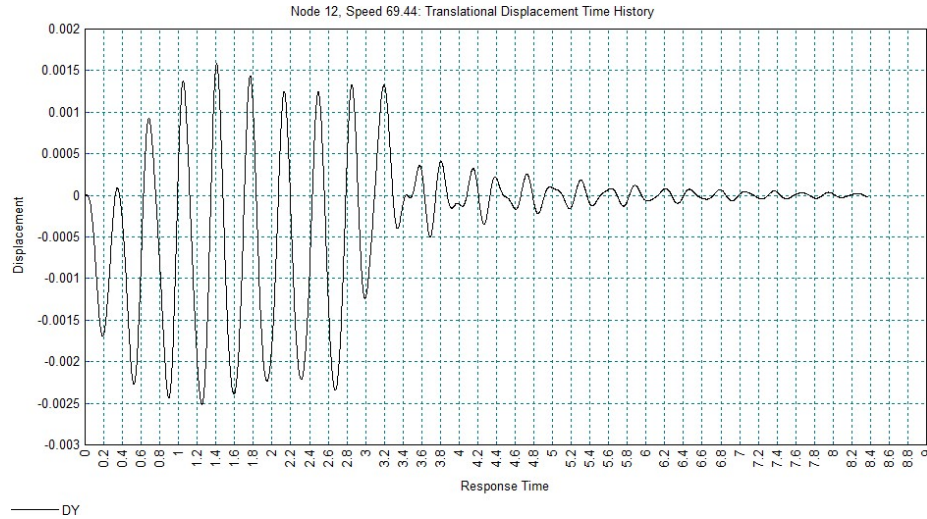
중앙 지간의 연직 방향 변위 응답

IMDPlus Output Control 대화 상자는 모델의 결과 출력을 제어합니다. 250 kph의 속도에 대해 연속보의 두 지간의 중앙, 즉 node 12와 node 32에서의 연직 방향 변위 응답을 검토합니다. 먼저 첫 번째 지간인 node 12를 검토합니다.

- **Node**를 선택하고 Extent를 **Individual**로 선택합니다
- Node number를 12(첫 번째 지간의 중앙에 있는 절점)로 입력합니다
- 다음의 Displacement **DY**결과를 선택합니다
- **Individual** 이 선택되어 있는지 확인합니다. 개별 절점이 처리되고 있으므로 Sum of chosen items와 Average of chosen items는 사용할 수 없습니다.
- **Response time history**가 선택되어 있는지 확인합니다.
- **Generate graphs in Modeller**가 선택되어 있는지 확인합니다.
- 해석을 진행하려면 Finish 버튼이 아닌 **Apply** 버튼을 클릭합니다.

참고. Finish 버튼 대신 Apply 버튼을 클릭하면

이후 그래프 플로팅을 위해 IMDPlus 세션이 활성 상태로 유지됩니다.



생성된 그래프는 250 kph로 주행하는 CRH 열차 편성의 통과에 대해 연속보 첫 번째 지간의 중앙에서의 연직 방향 변위 응답을 보여줍니다. 보의 최대 하향 처짐은 약 2.5 mm이고 최대 상향 처짐은 약 1.6 mm입니다. 열차 편성 통과 후의 quiet time을 통해 응답의 감쇠를 관찰할 수 있으며, 열차 편성이 연속보에 처음 진입한 후 약 8.5초가 지나면 대부분의 동적 응답이 감쇠됩니다. 이 응답은 Wang et al 논문의 첫 번째 지간 응답과 일치하며, 다만 부호 규약(sign convention)은 하향 방향을 양(positive)의 연직 변위로 정의하는 논문과 반대임에 유의해야 합니다.

- 그래프를 확인한 후 그래프를 닫습니다

이제 250 kph 속도에서 연속보 두 번째 지간의 중앙에서의 연직 방향 변위 응답을 검토합니다.

IMDPlus 툴바가 활성화되어 있는 경우,

- IMDPlus Output Control 대화 상자를 열려면 툴바의  버튼을 클릭합니다

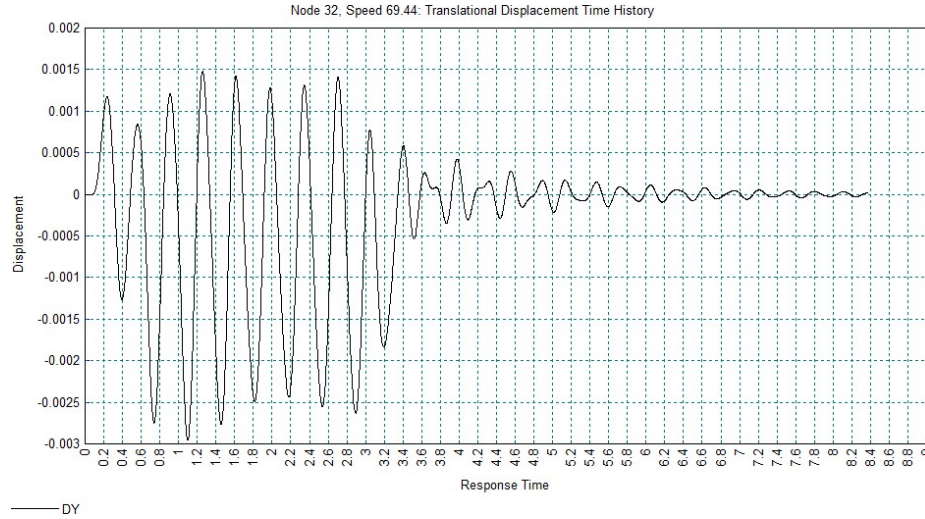
IMDPlus 툴바가 활성화되어 있지 않은 경우,

- IMDPlus Moving Mass Analysis Control 대화 상자를 열고 Next > 를 클릭하여 기존 해석 제어 설정을 유지한 채 IMDPlus Output Control 대화 상자를 엽니다.

- Node와 Extent as Individual이 계속 선택되어 있는지 확인합니다
- Node number를 32(두 번째 지간의 중앙에 있는 절점)로 입력합니다
- DY의 Displacement 결과를 플로팅하고 있는지 확인하고, 다른 모든 대화 상자 입력값이 변경되지 않았는지 확인합니다
- 진행하려면 Finish를 클릭합니다.

이제 IMDPlus는 두 번째 지간에 대해 진행됩니다. 디스크에 저장된 바이너리 결과 데이터베이스가 존재하므로, 이 해석의 솔루션 시간은 첫 번째 절점에 대한 것보다 더 짧습니다.

- IMDPlus가 생성한 임시 파일을 삭제하여 디스크 공간을 확보할지 묻는 메시지가 표시되면 No를 클릭합니다. **No**를 선택하면 약간의 디스크 공간을 사용하는 대신 이후 해석의 데이터 추출 시간을 절약할 수 있습니다.



생성된 그래프는 250 kph로 주행하는 CRH 열차 편성의 통과에 대해 연속보 두 번째 지간의 중앙에서의 연직 방향 변위 응답을 보여줍니다. 보의 최대 하향 처짐은 약 3 mm이고 최대 상향 처짐은 약 1.5 mm입니다. 이 응답 역시 Wang et al 논문의 두 번째 지간 응답과 일치하며, 다만 부호 규약은 하향 방향을 양의 연직 변위로 정의하는 논문과 반대임에 유의해야 합니다.

- 그래프를 확인한 후 그래프를 닫습니다

여러 속도에 대한 중앙 지간의 최대 연직 변위

연속보의 두 지간에 대한 응답은 250 kph의 단일 속도에 대해 검토되었습니다. 이 두 지간의 응답을 25kph에서 600 kph 사이의 속도 범위(25 kph 간격)에 대해 지금부터 검토하여 보의 응답에 가장 불리한 속도를 파악합니다.

- 메뉴를 통해 IMDPlus Moving Mass Analysis Control 대화 상자를 열거나 툴바의  버튼을 클릭합니다.
- 대화 상자의 Moving mass input 및 Mode/damping control 섹션이 이전 해석과 동일하게 유지되는지 확인합니다

- Minimum Speed를 6.944, Maximum Speed를 166.667, Speed Increment를 **6.944**로 입력하여 6.944 m/s(25 kph)에서 166.667 m/s(600 kph) 사이의 속도 범위를 6.944 m/s(25 kph) 간격으로 해석합니다.
- Quiet time after passage of load가 5인지 확인합니다
- IMDPlus automatic time step (Nyquist) 옵션이 선택 해제되어 있고 Solution time step이 2E-3인지 확인합니다
- 진행하려면 Next 버튼을 클릭합니다.
- 속도 범위가 올바른지 묻는 메시지가 표시되면 **Yes**를 선택하여 계속 진행합니다.
- 질량 참여 계수가 90% 미만이어서 총 질량이 부족하다는 메시지가 표시되면 **Yes**를 선택하여 계속 진행합니다.

IMDPlus Moving Mass Output Control 대화 상자가 표시됩니다.

IMDPlus Moving Mass Output Control

Node/element selection

☒ Node ☐ Element Entity: Displacement

Extent: Individual Component: DY

Node: 12

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

Spring-mass system selection

☐ Spring-mass system Result: Unsprung mass

Extent: Individual Entity: Displacement

System: 1 (0.0) CRH Train V

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: 1:6.944

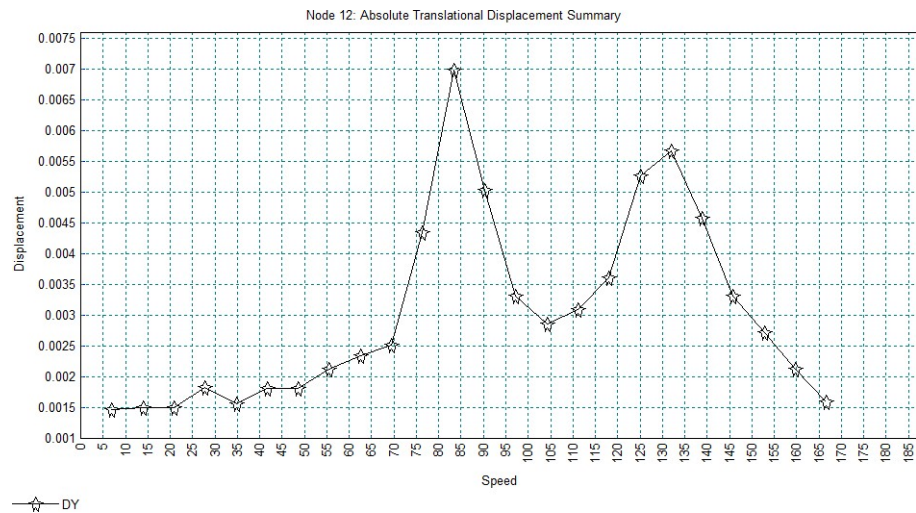
☐ Generate textfile output Options...

< Back Finish Apply Cancel Help

- Node와 Extent as Individual이 계속 선택되어 있는지 확인합니다
- Node number를 12로 입력합니다
- **Displacement results of DY**가 선택되어 있는지 확인합니다.
- **Individual items**가 선택되어 있는지 확인합니다.
- **Response time history**를 선택 해제 합니다.
- Peak response summary와 **Absolute**를 선택합니다
- **Generate graphs in Modeller**가 선택되어 있는지 확인합니다.
- 진행하려면 Apply 버튼을 클릭합니다.

이제 IMDPlus는 25 kph에서 600 kph 범위에서 선택된 24개의 속도 모두에 대해 sprung-mass와 연속보의 상호작용 거동을 계산합니다.

참고. 32개의 스프링-질량 시스템과 연속보가 24개의 속도에 대해 경로를 따라 이동할 때의 적합 응답(compatible response)에 대한 평형 계산이 복잡하기 때문에, 첫 번째 해석은 완료하는 데 추가 시간이 소요됩니다. 이 해석이 완료된 후에는 모달 정보나 해석 옵션에 변경 사항이 없는 한, 디스크에 저장된 바이너리 결과 데이터베이스로 인해 이후의 모든 솔루션이 상당히 더 빨라집니다.



그래프는 첫 번째 지간의 최악 연직 변위 응답이 열차 속도 300 kph에 해당하는 약 83.328 m/s 부근에서 발생함을 보여줍니다. 이 속도에서 최대 연직 변위 응답은 약 7 mm입니다. 두 번째 피크는 124.992 m/s(450 kph)와 131.936 m/s(475 kph) 사이의 속도에서 관찰됩니다. 이 두 피크는 모두 보의 처음 두 진동 모드에 대해 공진이 유발되는 속도가 302.67 kph 및 472.98 kph라고 명시한 Wang et al 논문과 일치합니다. 두 피크의 크기 역시 Wang et al과 일치합니다.

- 그래프를 확인한 후 그래프를 닫습니다.

이제 동일한 속도 범위에 대해 연속보 두 번째 지간의 중앙에서의 최대 연직 변위 응답을 검토합니다.

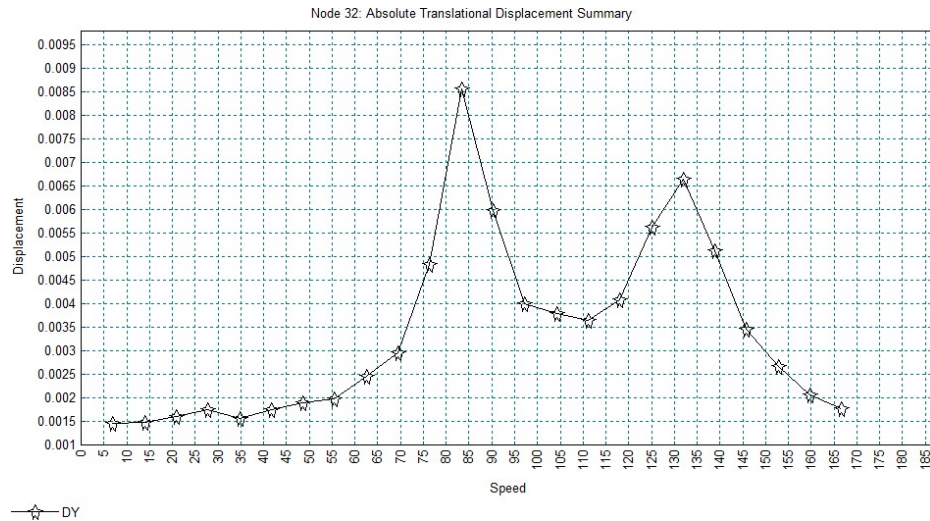
IMDPlus 툴바가 활성화되어 있는 경우,

- IMDPlus Output Control 대화 상자를 열려면 툴바의  버튼을 클릭합니다.

IMDPlus 툴바가 활성화되어 있지 않은 경우,

- IMDPlus Moving Mass Analysis Control 대화 상자를 열고 Next > 를 클릭하여 기존 해석 제어 설정을 유지한 채 IMDPlus Output Control 대화 상자를 엽니다.
- Node와 Extent as Individual이 계속 선택되어 있는지 확인합니다.
- Node number를 **32**로 입력합니다.
- DY의 Displacement 결과를 플로팅하고 있는지 확인하고, 다른 모든 대화 상자 입력값이 변경되지 않았는지 확인합니다.
- 진행하려면 Apply 버튼을 클릭합니다.

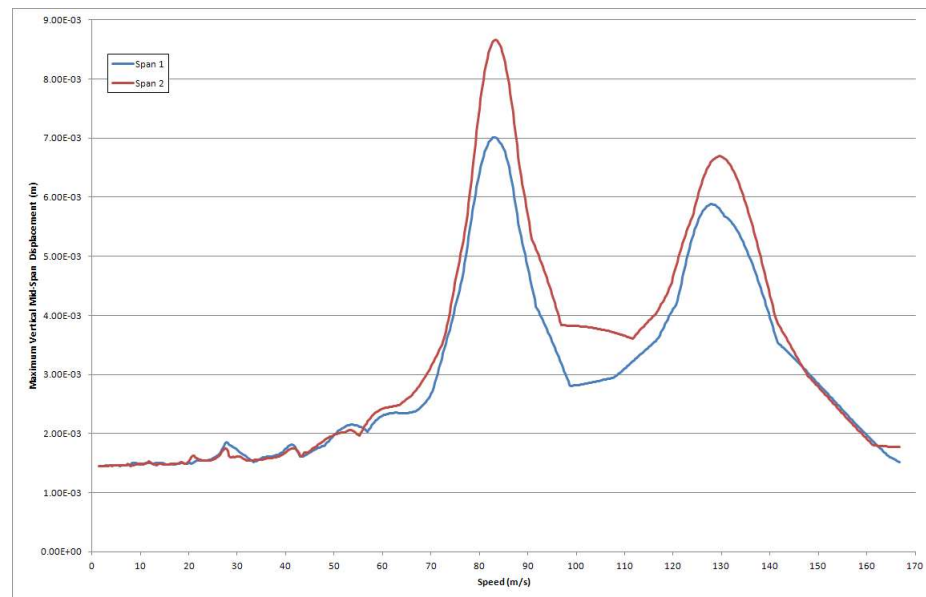
이제 IMDPlus 해석은 두 번째 지간에 대해 진행됩니다. 디스크에 저장된 바이너리 결과 데이터베이스가 존재하므로, 이 속도 범위에 대한 해석의 솔루션 시간은 첫 번째 절점에 대한 것보다 훨씬 더 짧습니다.



그래프는 두 번째 지간의 최악 연직 변위 응답 역시 열차 속도 300 kph에 해당하는 약 83.328 m/s 부근에서 발생함을 보여줍니다. 이 속도에서 최대 연직 변위 응답은 약 8.7 mm입니다. 두 번째 피크 역시 124.992 m/s(450 kph)와 131.936 m/s(475 kph) 사이의 속도에서 관찰됩니다. 이 두 피크는 모두 Wang et al 논문과 일치하며, 속도 범위를 더 세분화하면 논문과 동일하게 매끄러운 곡선을 얻을 수 있습니다.

- 그래프를 확인한 후 그래프를 닫습니다

참고. Wang et al 논문에서는 5 kph에서 600 kph 사이의 속도를 매우 작은 간격으로 검토하였기 때문에 위의 두 그래프보다 훨씬 매끄럽게 나타납니다. 이와 유사한 해상도의 속도 간격으로 이 해석을 수행하면, 논문의 결과와 일치하는 다음의 그래프를 IMDPlus로부터 얻을 수 있습니다(최소 속도 5 kph, 최대 속도 600 kph, 속도 증분 1 kph로 Microsoft Excel에서 함께 플로팅함).

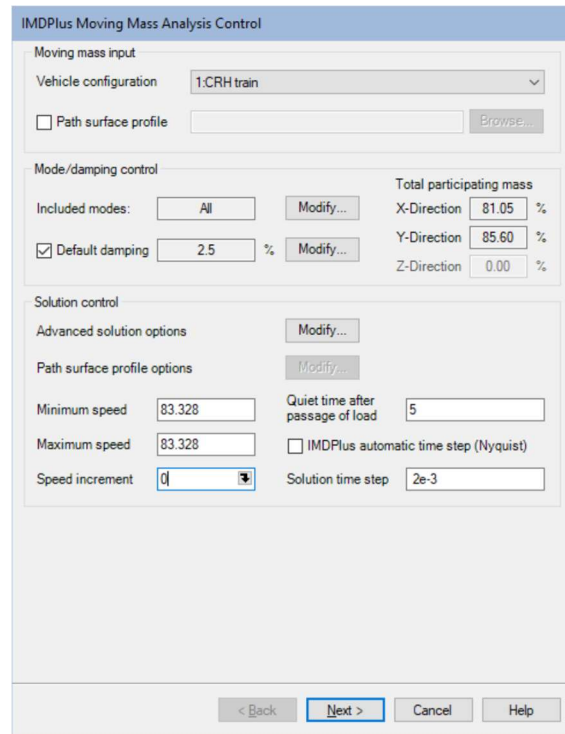


300 kph에서의 중앙 지간 공진 응답

300 kph (83.328 m/s)의 열차 속도에서는 이 속도 부근에서 연속보에 공진

응답이 발생하는 것으로 나타났습니다. 이제 이 속도에서 연속보의 두 중앙경간 절점에 대한 시간이력 응답을 살펴보겠습니다.

- 모델 창의 빈 부분을 클릭하여 (아직 선택되어 있는 경우) 피처나 절점의 선택을 해제합니다
- 모델 창의 빈 부분을 마우스 오른쪽 버튼으로 클릭하고 Advanced Selection...을 선택합니다
- Type and name을 **Node**로 설정하고 텍스트 박스에 **12,32**를 입력합니다
- OK를 클릭하여 두 중앙경간 절점을 모두 선택합니다
- 메뉴를 통해 IMDPlus Moving Mass Analysis Control 대화상자를 열거나 톨바의  버튼을 클릭합니다.



The image shows the 'IMDPlus Moving Mass Analysis Control' dialog box. It is divided into several sections: 'Moving mass input' with a 'Vehicle configuration' dropdown set to '1.CRH train' and a 'Path surface profile' section with a checkbox and a 'Browse...' button; 'Mode/damping control' with 'Included modes' set to 'All' and 'Default damping' checked at '2.5 %', alongside a 'Total participating mass' table showing X-Direction (81.05 %), Y-Direction (85.60 %), and Z-Direction (0.00 %); 'Solution control' with 'Advanced solution options' and 'Path surface profile options' each having a 'Modify...' button; and input fields for 'Minimum speed' (83.328), 'Maximum speed' (83.328), 'Speed increment' (0), 'Quiet time after passage of load' (5), 'IMDPlus automatic time step (Nyquist)' (unchecked), and 'Solution time step' (2e-3). At the bottom are '< Back', 'Next >', 'Cancel', and 'Help' buttons.

Total participating mass	
X-Direction	81.05 %
Y-Direction	85.60 %
Z-Direction	0.00 %

- 대화상자의 Moving mass input 및 Mode/damping control 섹션이 이전 해석과 동일하게 유지되어 있는지 확인합니다.
- 300 kph에 해당하는 단일 속도 **83.328 m/s**를 해석하기 위해 **Minimum Speed**를 **83.328**, **Maximum Speed**를 **83.328**, **Speed Increment**를 **0**으로 입력합니다.
- Quiet time after passage of load가 5로 설정되어 있는지 확인합니다.
- IMDPlus automatic time step (Nyquist) 옵션이 선택 해제되어 있고 Solution time step이 2E-3인지 확인합니다.
- 계속하려면 Next 버튼을 클릭하고, 해석의 질량 참여율이 90% 미만이라는 안내가 표시되면 Yes를 클릭합니다.

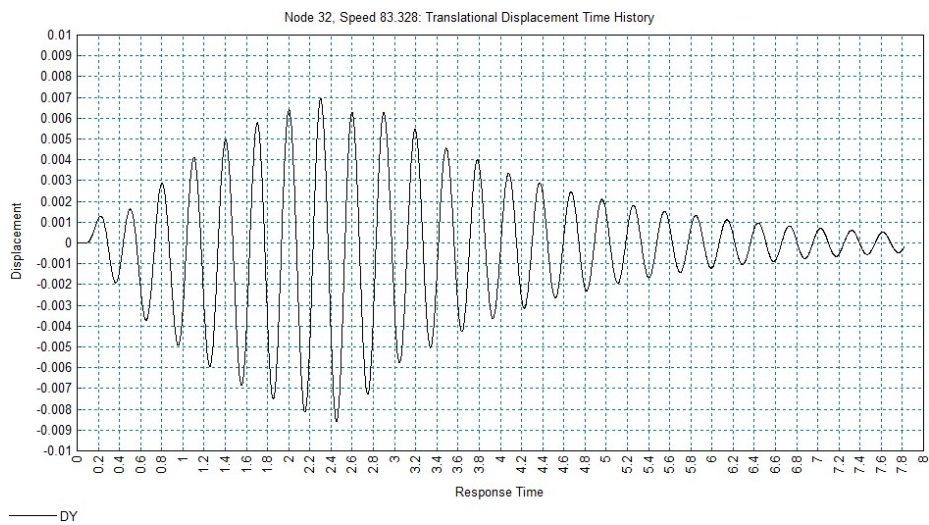
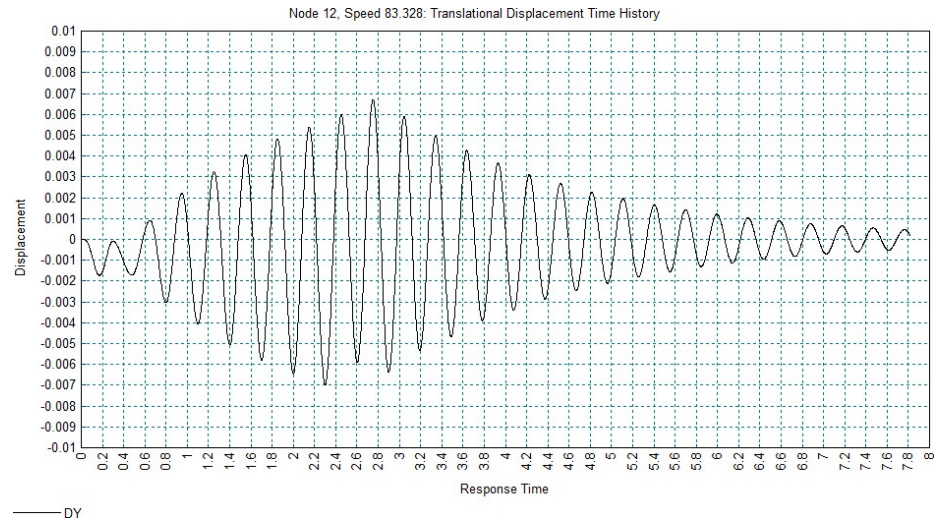
The image shows the 'IMDPlus Moving Mass Output Control' dialog box. It is divided into several sections:

- Node/element selection:**
 - ☒ Node, ☐ Element
 - Entity: Displacement
 - Extent: Selected
 - Component: DY
 - Node: 32
 - ☒ Individual items, ☐ Sum of chosen items, ☐ Average of chosen items
- Spring-mass system selection:**
 - ☐ Spring-mass system
 - Result: Unsprung mass
 - Extent: Individual
 - Entity: Displacement
 - System: 1 (0.0) CRH Train V
- Output control:**
 - ☒ Response time history
 - ☐ Peak response summary
 - ☐ Secondary response spectra (SRS)
 - ☐ Modal combination/factor history
 - ☒ Generate graphs in Modeller
 - ☐ Generate textfile output
 - Positive/negative: ☐ Positive/negative, ☒ Absolute
 - Envelope: ☐ Envelope
 - Speed to graph: 1:83.328

At the bottom, there are buttons: < Back, Finish, Apply (highlighted), Cancel, and Help.

- **Node**를 선택하고 Extent를 **Selected**로 설정합니다.
- **DY**의 **Displacement** 결과가 선택되어 있는지 확인합니다.
- **Individual items**가 선택되어 있는지 확인합니다.
- Sum of chosen items 및 **Average of chosen items**가 선택 해제되어 있는지 확인합니다.
- **Response time history**를 선택합니다.
- Peak response summary의 선택을 해제합니다.
- **Generate graphs in Modeller**가 선택되어 있는지 확인합니다.
- Speed to graph가 1:83.328(300 kph에 해당)로 설정되어 있는지 확인합니다.
- 계속하려면 **Apply** 버튼을 클릭합니다.
- 선택한 모든 절점을 처리할지 묻는 메시지가 표시되면 **Yes**를 선택합니다.

두 중앙경간 절점의 응답은 아래에 나타나 있으며, 먼저 첫 번째 경간(절점 12)에 대해, 다음으로 두 번째 경간(절점 32)에 대해 나타나 있습니다. 두 그림 모두에서 열차의 마지막 윤축이 구조물을 벗어나는 2.82초까지 연속보의 공진이 관찰됩니다. 이 시점 이후에는 감쇠로 인해 보의 수직 응답이 점차 감소하며 결국 정적 상태로 복귀합니다.



- 그래프가 표시되면 그래프를 닫습니다.

첫 번째 및 마지막 스프링-질량 시스템의 변위 시간이력

이전 해석에서는 다양한 속도 범위에서 CRH 열차 세트가 통과할 때 연속보의 수직 변위 응답에 초점을 맞추었습니다. 이제 실제 열차 자체의 응답을 살펴보겠습니다.

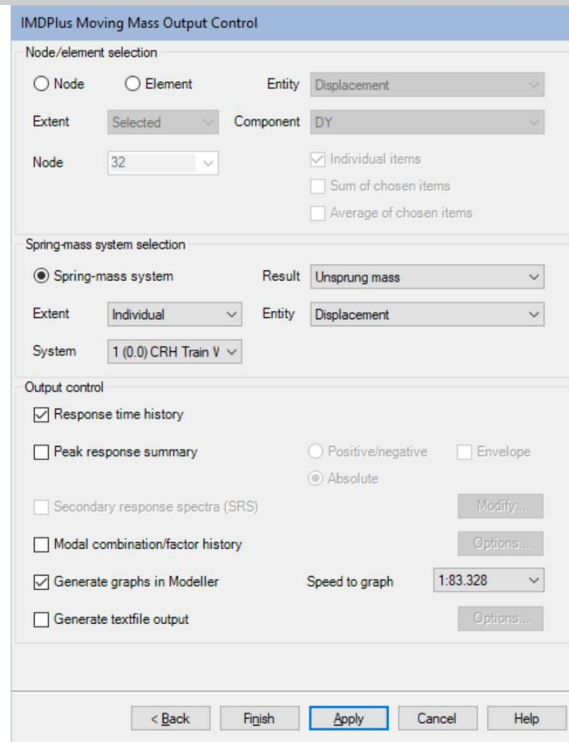
첫 번째 스프링-질량 시스템

IMDPlus 툴바가 활성화되어 있는 경우,

- 툴바의  버튼을 클릭하여 IMDPlus Output Control 대화상자를 엽니다.

IMDPlus 툴바가 활성화되어 있지 않은 경우,

- IMDPlus Moving Mass Analysis Control 대화 상자를 열고 Next > 를 클릭하여 기존 해석 제어 설정을 유지한 채 IMDPlus Output Control 대화 상자를 엽니다.



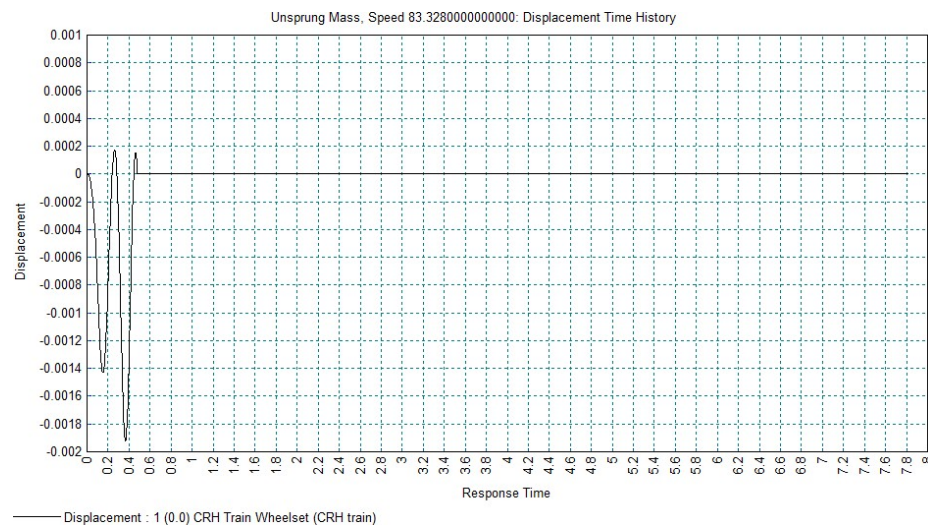
The dialog box is titled "IMDPlus Moving Mass Output Control" and is divided into three main sections: "Node/element selection", "Spring-mass system selection", and "Output control".

- Node/element selection:** Includes radio buttons for "Node" and "Element", a dropdown for "Entity" (set to "Displacement"), a dropdown for "Extent" (set to "Selected"), a dropdown for "Component" (set to "DY"), and a dropdown for "Node" (set to "32"). There are also checkboxes for "Individual items" (checked), "Sum of chosen items", and "Average of chosen items".
- Spring-mass system selection:** Includes a radio button for "Spring-mass system" (selected), a dropdown for "Result" (set to "Unsprung mass"), a dropdown for "Extent" (set to "Individual"), a dropdown for "Entity" (set to "Displacement"), and a dropdown for "System" (set to "1 (0.0) CRH Train V").
- Output control:** Includes checkboxes for "Response time history" (checked), "Peak response summary", "Secondary response spectra (SRS)", "Modal combination/factor history", "Generate graphs in Modeller" (checked), and "Generate textfile output". There are also radio buttons for "Positive/negative", "Envelope", and "Absolute" (selected). Buttons for "Modify...", "Options...", and "Speed to graph" (set to "1.83.328") are present.

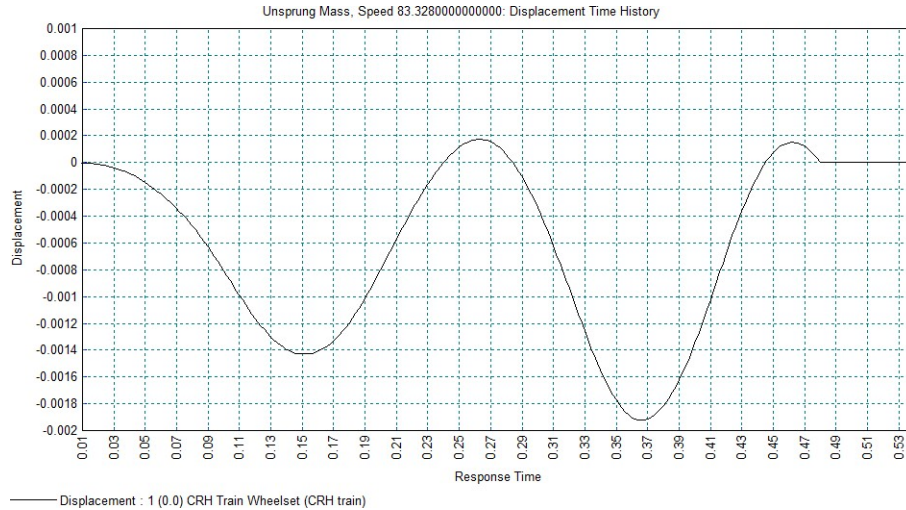
At the bottom, there are buttons for "< Back", "Finish", "Apply" (highlighted with a blue border), "Cancel", and "Help".

- **Spring-mass system**을 선택합니다. 그리고 Extent를 **Individual**로 설정합니다.
- System을 **1(0.0) CRH Train WheelSet**으로 설정합니다.
- Result를 **Unsprung mass**로 설정합니다.
- Entity를 **Displacement**로 설정합니다
- Output control의 모든 선택 항목이 이전 해석과 동일한지 확인합니다
- 계속하려면 **Apply** 버튼을 클릭합니다.

이제 결과 플로팅이 진행됩니다. 스프링-질량 시스템 결과는 이미 확보되어 있어야 하므로 IMDPlus가 해석을 다시 풀 필요는 없습니다.



다음 그래프는 시간이력의 처음 0.5초 구간을 박스 선택으로 드래그하여 확대한 후의 곡선을 보여줍니다. 이는 약 0.48초 후에 Unsprung mass의 변위가 0으로 돌아온다는 것(즉, 첫 번째 스프링-질량 시스템이 구조물을 벗어났다는 것)을 나타냅니다. 이는 연속보의 전체 길이를 속도로 나누어, $40 / 83.328 = 0.48$ 초로 확인할 수 있습니다.



- 그래프를 확인한 후 그래프를 닫습니다.

IMDPlus 툴바가 활성화되어 있는 경우, 툴바의  버튼을 클릭하여 IMDPlus Output Control 대화상자를 엽니다

IMDPlus 툴바가 활성화되어 있지 않은 경우,

- IMDPlus Moving Mass Analysis Control 대화 상자를 열고 Next > 를 클릭하여 기존 해석 제어 설정을 유지한 채 IMDPlus Output Control 대화 상자를 엽니다.

- **Spring-mass system**이 선택되어 있는지 확인합니다.
- Extent가 Individual로 설정되어 있는지 확인합니다
- System이 **1 (0.0) CRH Train Wheelset**로 설정되어 있는지 확인합니다
- Result를 **Sprung mass 1**로 설정합니다
- Entity가 **Displacement**로 설정되어 있는지 확인합니다

- Output control의 모든 선택 항목이 이전 해석과 동일한지 확인합니다.
- 계속하려면 **Apply** 버튼을 클릭합니다.

IMDPlus Moving Mass Output Control

Node/element selection

☐ Node ☐ Element Entity: Displacement

Extent: Selected Component: DY

Node: 32

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

Spring-mass system selection

☒ Spring-mass system Result: Sprung mass 1

Extent: Individual Entity: Displacement

System: 1 (0.0) CRH Train V

Output control

☒ Response time history

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

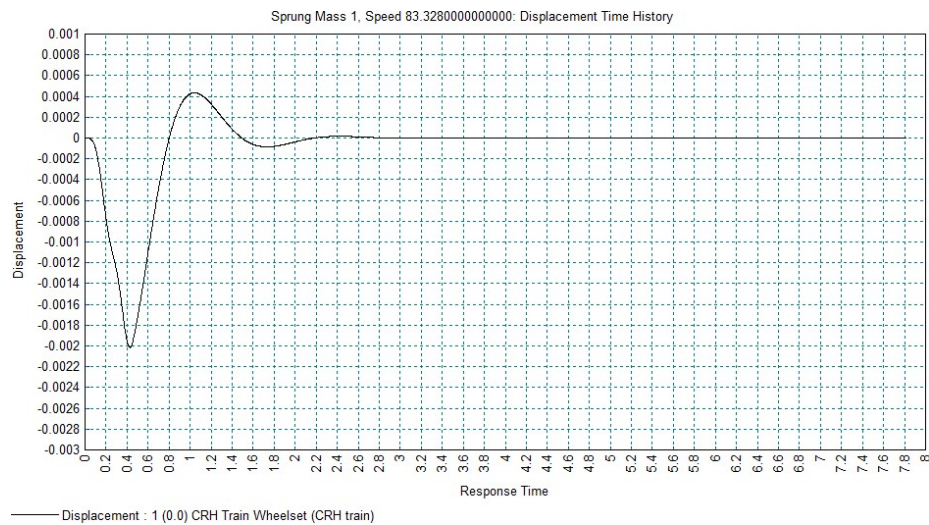
☐ Secondary response spectra (SRS) [Modify...](#)

☐ Modal combination/factor history [Options...](#)

☒ Generate graphs in Modeller Speed to graph: 1:83.328 [Options...](#)

☐ Generate textfile output

< Back Finish **Apply** Cancel Help



그래프는 열차의 첫 번째 윤축의 차체를 나타내는 Sprung mass가 연속보에 처음 진입한 후 0.43초 시점에 정적 위치로부터 2mm를 약간 넘는 변위를 보이며, 스프링-질량 시스템의 점성 감쇠에 의해 윤축이 구조물을 벗어난 후(0.48초 시점) 2~2.5초 이내에 차체 거동이 빠르게 감쇠됨을 보여줍니다.

- 그래프를 확인한 후 그래프를 닫습니다

참고. Sprung mass에 대한 모든 결과는 정적 평형 위치를 기준으로 합니다. Sprung mass의 정적 변위는 해석 시작 시 IMDPlus.log 파일에 요약되어 있습니다.

마지막 스프링-질량 시스템

마지막 스프링-질량 시스템은 첫 번째 시스템으로부터 195m 뒤에 위치하므로, 이 시스템이 보에 진입할 때까지 연속보는 31개의 스프링-질량 시스템으로부터 동적 입력을 받게 됩니다. 그 결과, Unsprung mass 및 Sprung mass의 수직 변위는 위에서 제시된 그래프와는 다를 것으로 예상됩니다.

IMDPlus 툴바가 활성화되어 있는 경우,

- 툴바의  버튼을 클릭하여 IMDPlus Output Control 대화상자를 엽니다

IMDPlus 툴바가 활성화되어 있지 않은 경우,

- IMDPlus Moving Mass Analysis Control 대화 상자를 열고 Next > 를 클릭하여 기존 해석 제어 설정을 유지한 채 IMDPlus Output Control 대화 상자를 엽니다.

IMDPlus Moving Mass Output Control

Node/element selection

☐ Node ☐ Element Entity: Displacement

Extent: Selected Component: DY

Node: 32

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

Spring-mass system selection

☒ Spring-mass system Result: Sprung mass 1

Extent: Individual Entity: Displacement

System: 1 (0.0) CRH Train V

Output control

☒ Response time history

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

☐ Secondary response spectra (SRS) [Modify...](#)

☐ Modal combination/factor history [Options...](#)

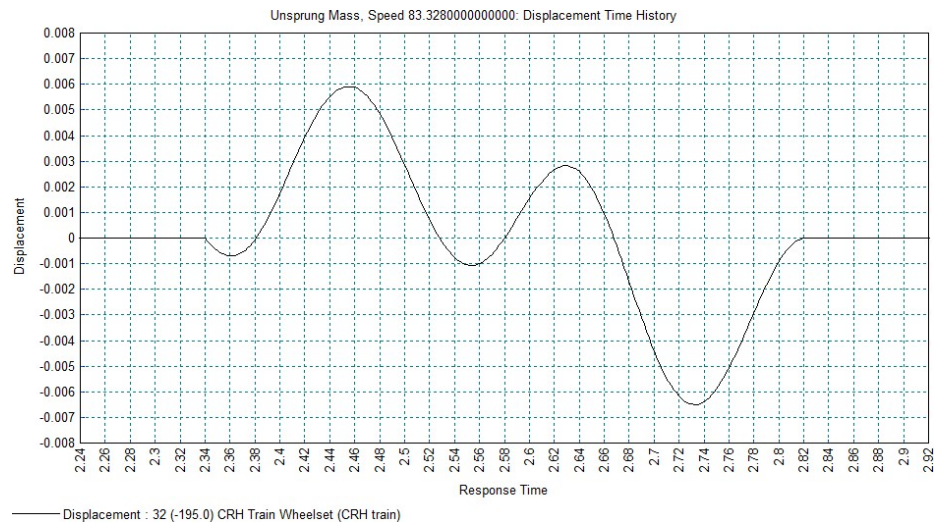
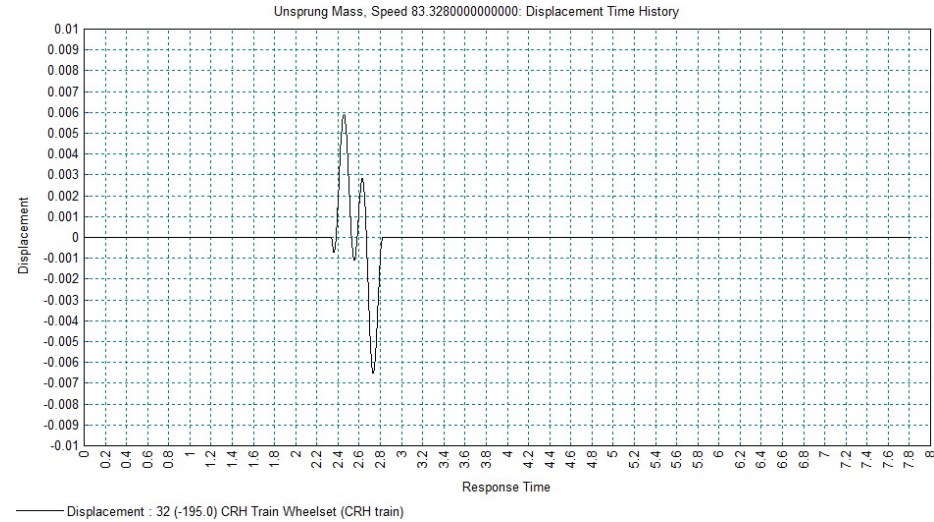
☒ Generate graphs in Modeller Speed to graph: 1.83.328

☐ Generate textfile output [Options...](#)

< Back Finish **Apply** Cancel Help

- **Spring-mass system**이 선택되어 있는지 확인합니다
- Extent가 **Individual**로 설정되어 있는지 확인합니다
- System을 **32 (-195.0) CRH Train Wheelset**로 설정합니다
- Result를 **Unsprung mass**로 설정합니다
- Entity를 **Displacement**로 설정되어 있는지 확인합니다
- Output control의 모든 선택 항목이 이전 해석과 동일한지 확인합니다
- 계속하려면 **Apply** 버튼을 클릭합니다.

다음 그래프는 전체 시간이력에 대한 마지막 Sprung mass의 수직 변위와, 동적 거동이 관찰되는 구간을 확대한 그래프를 보여줍니다.



이는 약 2.34초에 구조물에 진입할 때까지 Unsprung mass의 변위가 0이며, 구조물을 벗어난 후 약 2.8초 후에 다시 0으로 돌아온다는 것을 나타냅니다. 스프링-질량 시스템이 보 위에 있는 동안의 수직 변위 응답을 위의 첫 번째

Unsprung mass 시스템과 비교하면, 연속보의 기존 진동이 Unsprung mass의 거동을 어떻게 변화시켰는지 알 수 있습니다.

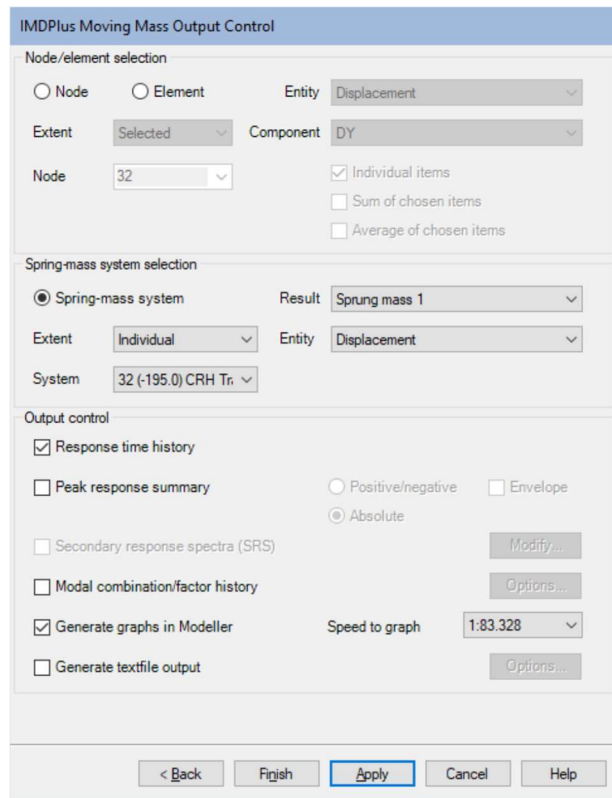
- 그래프를 확인한 후 그래프를 닫습니다.

IMDPlus 툴바가 활성화되어 있는 경우,

- 툴바의  버튼을 클릭하여 IMDPlus Output Control 대화상자를 엽니다

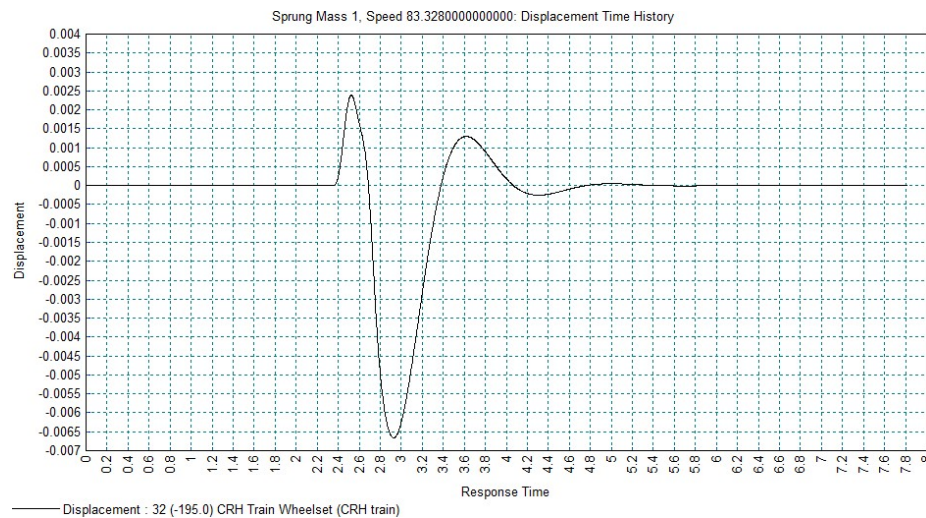
IMDPlus 툴바가 활성화되어 있지 않은 경우,

- IMDPlus Moving Mass Analysis Control 대화 상자를 열고 Next > 를 클릭하여 기존 해석 제어 설정을 유지한 채 IMDPlus Output Control 대화 상자를 엽니다.



The image shows the 'IMDPlus Moving Mass Output Control' dialog box. It is divided into three main sections: 'Node/element selection', 'Spring-mass system selection', and 'Output control'.
 - **Node/element selection**: Includes radio buttons for 'Node' and 'Element', a dropdown for 'Entity' (set to 'Displacement'), a dropdown for 'Extent' (set to 'Selected'), a dropdown for 'Component' (set to 'DY'), and a dropdown for 'Node' (set to '32'). There are also checkboxes for 'Individual items' (checked), 'Sum of chosen items', and 'Average of chosen items'.
 - **Spring-mass system selection**: Includes a radio button for 'Spring-mass system' (selected), a dropdown for 'Result' (set to 'Sprung mass 1'), a dropdown for 'Extent' (set to 'Individual'), a dropdown for 'Entity' (set to 'Displacement'), and a dropdown for 'System' (set to '32 (-195.0) CRH Tr').
 - **Output control**: Includes checkboxes for 'Response time history' (checked), 'Peak response summary', 'Secondary response spectra (SRS)', 'Modal combination/factor history', 'Generate graphs in Modeller' (checked), and 'Generate textfile output'. There are also radio buttons for 'Positive/negative' and 'Envelope' (both unchecked), and a radio button for 'Absolute' (checked). There are buttons for 'Modify...', 'Options...', and 'Speed to graph' (set to '1:83.328').
 At the bottom, there are buttons for '< Back', 'Finish', 'Apply' (highlighted with a blue border), 'Cancel', and 'Help'.

- **Spring-mass system**이 선택되어 있는지 확인합니다.
- Extent가 Individual로 설정되어 있는지 확인합니다.
- System이 **32 (-195.0) CRH Train Wheelset**로 설정되어 있는지 확인합니다.
- Result를 **Sprung mass 1**로 설정합니다.
- Entity가 **Displacement**로 설정되어 있는지 확인합니다.
- Output control의 모든 선택 항목이 이전 해석과 동일한지 확인합니다
- 계속하려면 **Apply** 버튼을 클릭합니다.



그래프는 열차의 마지막 윤축의 차체를 나타내는 Sprung mass가 연속보 위에 있는 동안 정적 위치로부터 거의 6.7mm 변위를 보이며, 윤축이 구조물을 벗어난 후 스프링-질량 시스템의 감쇠에 의해 차체 거동이 빠르게 감쇠됨을 보여줍니다.

- 그래프를 확인한 후 그래프를 닫습니다

첫 번째 및 마지막 스프링-질량 시스템 차체의 가속도 시간이력

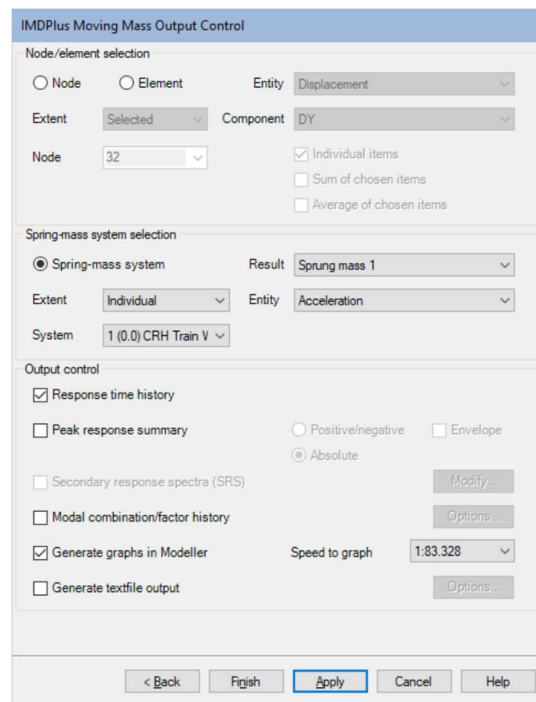
기관차 및 객차의 차체를 나타내는 Sprung mass의 가속도 응답을 승객이 체감하는 승차감 수준을 평가하는 데 사용할 수 있습니다. 첫 번째 및 마지막 스프링-질량 시스템에 대한 Sprung mass의 가속도를 살펴보겠습니다.

IMDPlus 툴바가 활성화되어 있는 경우,

- 툴바의  버튼을 클릭하여 IMDPlus Output Control 대화상자를 엽니다

IMDPlus 툴바가 활성화되어 있지 않은 경우,

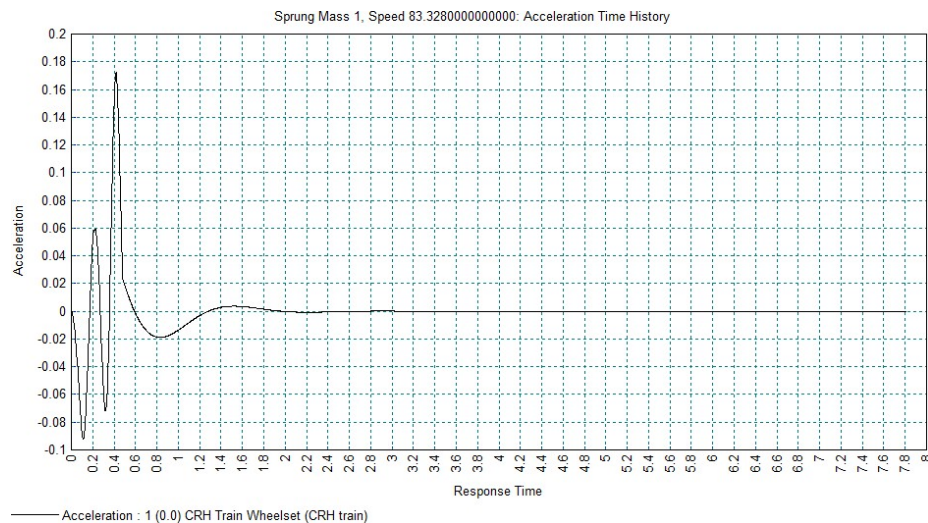
- IMDPlus Moving Mass Analysis Control 대화 상자를 열고 Next > 를 클릭하여 기존 해석 제어 설정을 유지한 채 IMDPlus Output Control 대화 상자를 엽니다.



The image shows the 'IMDPlus Moving Mass Output Control' dialog box. It is divided into three main sections: 'Node/element selection', 'Spring-mass system selection', and 'Output control'.
 - In 'Node/element selection', 'Node' is selected, 'Entity' is 'Displacement', 'Extent' is 'Selected', 'Component' is 'DY', and 'Node' is '32'. There are checkboxes for 'Individual items' (checked), 'Sum of chosen items', and 'Average of chosen items'.
 - In 'Spring-mass system selection', 'Spring-mass system' is selected, 'Result' is 'Sprung mass 1', 'Extent' is 'Individual', 'Entity' is 'Acceleration', and 'System' is '1 (0.0) CRH Train V'.
 - In 'Output control', 'Response time history' is checked. There are checkboxes for 'Peak response summary', 'Secondary response spectra (SRS)', 'Modal combination factor history', and 'Generate graphs in Modeller' (checked). There are also checkboxes for 'Positive/negative', 'Envelope', and 'Absolute' (selected). There are buttons for 'Modify...', 'Options...', and 'Speed to graph' (set to 1:83.328). There is also a checkbox for 'Generate textfile output' and an 'Options...' button.
 At the bottom, there are buttons for '< Back', 'Finish', 'Apply' (highlighted), 'Cancel', and 'Help'.

- **Spring-mass system**이 선택되어 있는지 확인합니다
- Extent가 Individual로 설정되어 있는지 확인합니다
- System을 **1(0.0) CRH Train Wheelset**으로 설정합니다
- Result가 **Sprung mass1**로 설정되어 있는지 확인합니다
- Entity를 **Acceleration**으로 설정합니다
- Output control의 모든 선택 항목이 이전 해석과 동일한지 확인합니다
- 계속하려면 **Apply** 버튼을 클릭합니다.

다음 그래프는 첫 번째 윤축의 차체에 대한 수직 가속도 응답을 보여주며, 이 윤축은 연속보를 벗어나기 직전에 최대 가속도 $+0.174 \text{ m/s}^2$ (0.018 g)를 경험합니다. 첫 번째 윤축에 대한 이 최대 가속도는 연속보의 동적 응답이 아직 증가하는 중에 발생하므로, 열차의 후속 윤축에서는 더 높은 최대 가속도가 발생할 것으로 예상될 수 있습니다.



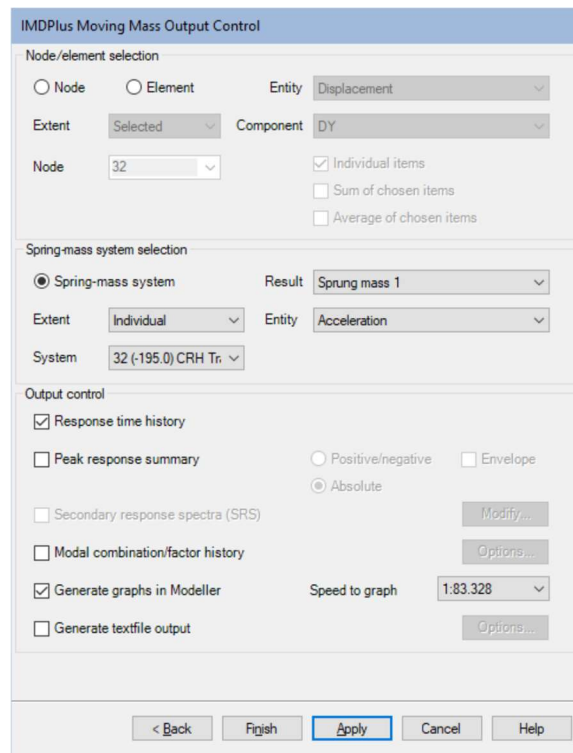
- 그래프를 확인한 후 그래프를 닫습니다.

IMDPlus 툴바가 활성화되어 있는 경우,

- 툴바의  버튼을 클릭하여 IMDPlus Output Control 대화상자를 엽니다

IMDPlus 툴바가 활성화되어 있지 않은 경우,

- IMDPlus Moving Mass Analysis Control 대화 상자를 열고 Next > 를 클릭하여 기존 해석 제어 설정을 유지한 채 IMDPlus Output Control 대화 상자를 엽니다.



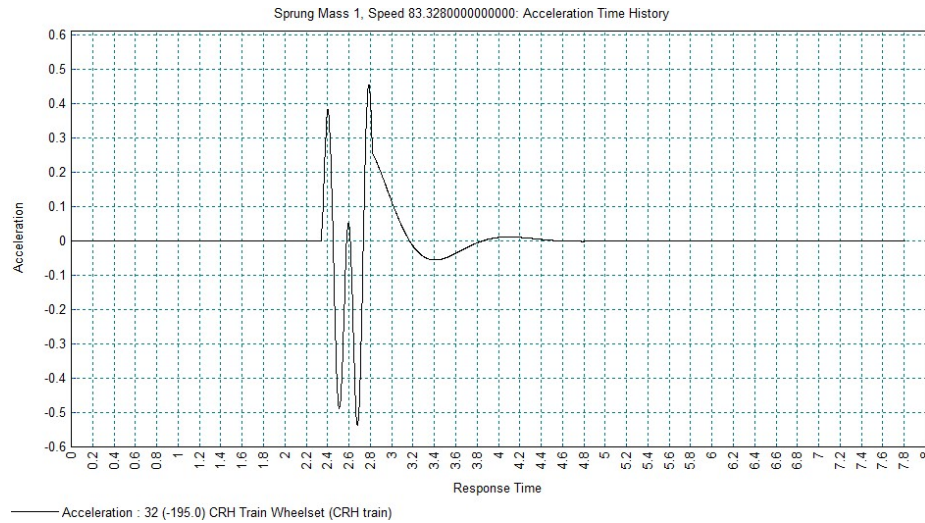
The image shows the 'IMDPlus Moving Mass Output Control' dialog box. It is divided into several sections:

- Node/element selection:** Includes radio buttons for 'Node' and 'Element', an 'Entity' dropdown set to 'Displacement', an 'Extent' dropdown set to 'Selected', a 'Component' dropdown set to 'DY', and a 'Node' dropdown set to '32'. There are also checkboxes for 'Individual items' (checked), 'Sum of chosen items', and 'Average of chosen items'.
- Spring-mass system selection:** Includes a radio button for 'Spring-mass system' (selected), a 'Result' dropdown set to 'Sprung mass 1', an 'Extent' dropdown set to 'Individual', an 'Entity' dropdown set to 'Acceleration', and a 'System' dropdown set to '32 (-195.0) CRH Tr'.
- Output control:** Includes checkboxes for 'Response time history' (checked), 'Peak response summary', 'Secondary response spectra (SRS)', 'Modal combination/factor history', 'Generate graphs in Modeller' (checked), and 'Generate textfile output'. There are also radio buttons for 'Positive/negative' and 'Envelope' (both unchecked), and a radio button for 'Absolute' (checked). There are buttons for 'Modify...', 'Options...', and 'Speed to graph' (set to '1:83.328').

At the bottom, there are buttons for '< Back', 'Finish', 'Apply' (highlighted with a blue border), 'Cancel', and 'Help'.

- Spring-mass system이 선택되어 있는지 확인합니다.
- Extent가 Individual로 설정되어 있는지 확인합니다.
- System을 32 (-195.0) CRH Train Wheelset으로 설정합니다.

- Result가 **Sprung mass 1**로 설정되어 있는지 확인합니다
- Entity가 **Acceleration**으로 설정되어 있는지 확인합니다
- Output control의 모든 선택 항목이 이전 해석과 동일한지 확인합니다
- 계속하려면 **Finish** 버튼을 클릭합니다. 디스크 공간을 확보할지 묻는 메시지가 표시되면 No를 클릭합니다.



그래프는 마지막 윤축의 차체에 대한 수직 가속도 응답을 보여주며, 이 윤축이 연속보를 벗어나기 직전에 최대 가속도 -0.536 m/s^2 (-0.054 g)를 경험함을 나타냅니다. 마지막 윤축에 대한 이 최대 가속도는 보가 이미 이전의 모든 윤축으로부터 가진을 받은 상태이므로, 열차의 후속 윤축에서 예상되는 바와 같이 첫 번째 윤축보다 현저히 높습니다.

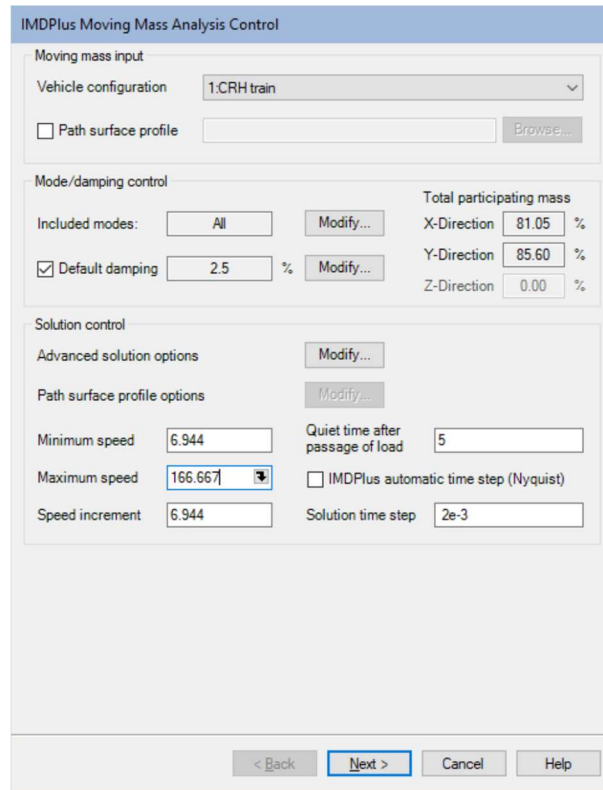
- 그래프를 확인한 후 그래프를 닫습니다

전체 열차 차체의 최대 가속도 응답

이전 그래프에서는 열차의 첫 번째 및 마지막 윤축의 차체를 나타내는 Sprung mass의 가속도 응답을 살펴보았습니다. 이제 25 kph에서 600 kph의 속도 범위에 대해 열차의

차체를 나타내는 모든 Sprung mass의 최대 수직 가속도 응답을 살펴보겠습니다.

- 메뉴를 통해 IMDPlus Moving Mass Analysis Control 대화상자를 열거나 툴바의  버튼을 클릭합니다.



The dialog box is titled "IMDPlus Moving Mass Analysis Control". It contains several sections:

- Moving mass input:**
 - Vehicle configuration: 1:CRH train
 - Path surface profile: (empty) with a "Browse..." button.
- Mode/damping control:**
 - Included modes: All (with a "Modify..." button)
 - Default damping: 2.5 % (with a "Modify..." button)
 - Total participating mass:
 - X-Direction: 81.05 %
 - Y-Direction: 85.60 %
 - Z-Direction: 0.00 %
- Solution control:**
 - Advanced solution options: (with a "Modify..." button)
 - Path surface profile options: (with a "Modify..." button)
 - Minimum speed: 6.944
 - Maximum speed: 166.667 (with a dropdown arrow)
 - Speed increment: 6.944
 - Quiet time after passage of load: 5
 - IMDPlus automatic time step (Nyquist): (unchecked)
 - Solution time step: 2e-3

At the bottom, there are four buttons: "< Back", "Next >" (highlighted with a blue border), "Cancel", and "Help".

- 대화상자의 Moving mass input 및 Mode/damping control 섹션이 이전 해석과 동일하게 유지되어 있는지 확인합니다.
- Minimum Speed를 6.944, Maximum Speed를 166.667, Speed Increment를 **6.944**로 입력하여 6.944 m/s (25 kph)에서 166.667 m/s (600 kph)까지의 속도 범위를 6.944 m/s (25 kph) 간격으로 해석합니다.
- Quiet time after passage of load가 5로 설정되어 있는지 확인합니다
- IMDPlus automatic time step (Nyquist) 옵션이 선택 해제되어 있고 Solution

time step이 2E-3인지 확인합니다

- 계속하려면 Next 버튼을 클릭합니다. 속도 범위가 올바른지 묻는 메시지가 표시되면 **Yes**를 선택하여 계속합니다. 질량 참여율이 90% 미만이어서 총 질량이 누락되었다는 메시지가 표시되면 **Yes**를 선택하여 계속합니다.

IMDPlus Moving Mass Output Control

Node/element selection

☐ Node ☐ Element Entity: Displacement

Extent: Selected Component: RSLT

Node: 32

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

Spring-mass system selection

☒ Spring-mass system Result: Sprung mass 1

Extent: All Entity: Acceleration

System: 32 (-195.0) CRH Tr

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: 1:6.944

☐ Generate textfile output Options...

< Back Finish Apply Cancel Help

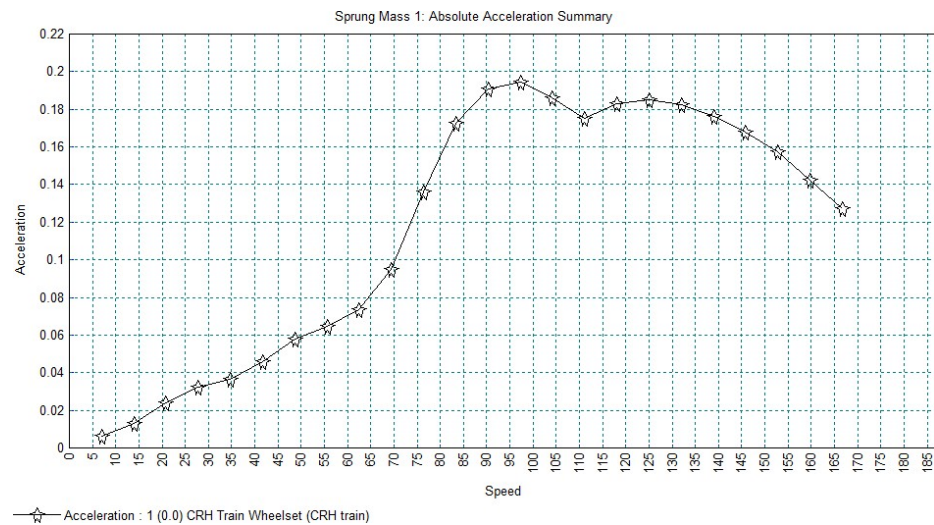
- Spring-mass system**을 선택합니다.
- Extent를 **All**로 설정합니다
- Result가 **Sprung mass 1**로 설정되어 있는지 확인합니다
- Entity가 **Acceleration**으로 설정되어 있는지 확인합니다
- Response time history**를 선택 해제합니다
- Peak response summary**와 **Absolute**를 선택합니다

- Output control의 다른 선택 항목들이 이전 해석과 동일한지 확인합니다
- 진행하려면 **Finish** 버튼을 클릭합니다.
- 질문을 받으면 Yes를 클릭합니다.

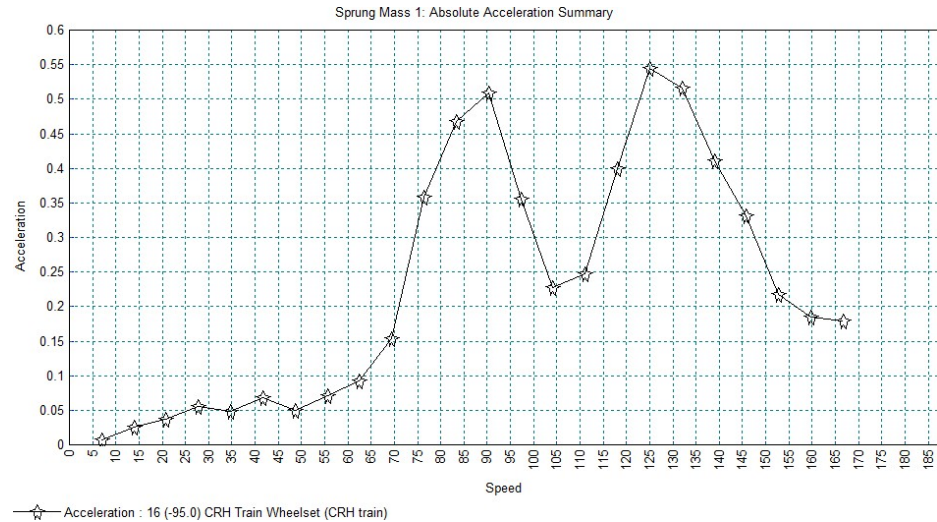
IMDPlus에서 생성된 임시 파일을 삭제하여 디스크 공간을 확보할지 여부를 묻습니다.

IMDPlus가 해석을 수행하며, 32개의 스프링-질량 시스템 전체에 대한 그래프가 표시되고 출력할 수 있습니다.

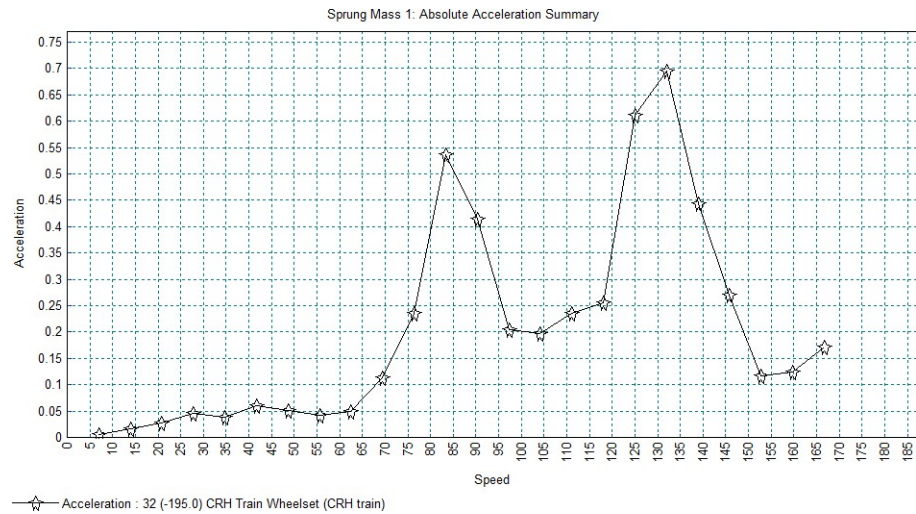
다음은 그래프의 예시로, 열차를 구성하는 각 스프링 바디(첫 번째 스프링-질량 시스템, 열여섯 번째 스프링-질량 시스템, 마지막 스프링-질량 시스템)의 서로 다른 거동을 보여줍니다.



(첫 번째 스프링-질량 시스템)



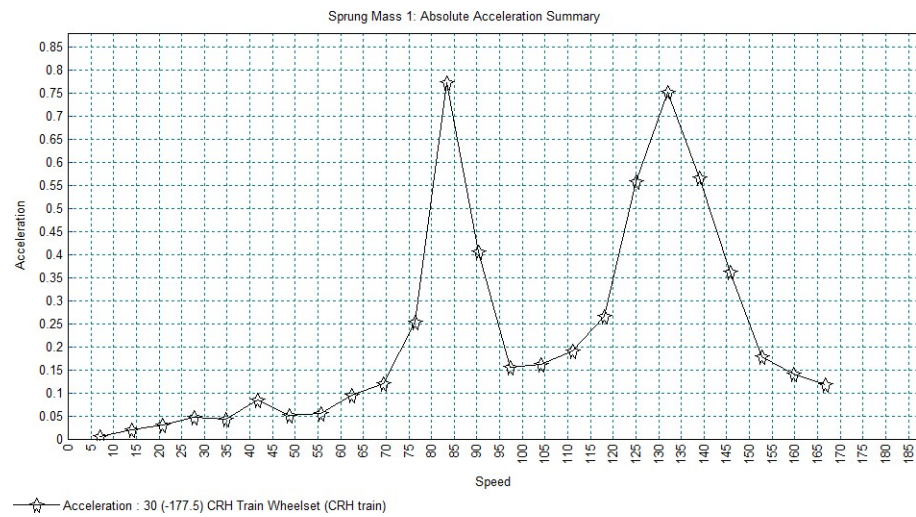
(열여섯 번째 스프링-질량 시스템)



(마지막 스프링-질량 시스템)

속도 범위에 걸친 스프링 바디의 절대 최대 수직 가속도 그래프를 보면, 이미 보를 통과한 휠셋 스프링-질량 시스템의 수가 많아질수록 최대 가속도가 증가하는 것처럼 보입니다. 이는 대체로 사실이지만, 각 휠셋 스프링-질량 시스템을 개별적으로 살펴보면 열차 전체 32개 휠셋 중 절대 최대 가속도는 실제로는 다음 그래프에 나타난 바와 같이 30번째 휠셋에서 발생하는 것을 알

수 있습니다.



30번째 휠셋의 경우 절대 최대 가속도는 열차 속도 300 kph에 해당하는 첫 번째 공진 주파수에서 관측되며, 그 값은 약 0.78 m/s², 즉 거의 0.08 g입니다.

- 모든 그래프 창을 닫습니다.

모델 저장

모델을 저장합니다.

이것으로 예제가 완료됩니다.

