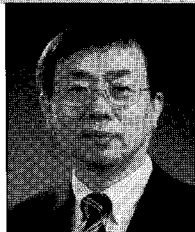
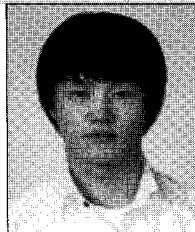


XFINAS를 이용한 교량-고속열차(KTX)의 동적 상호작용에 의한 승차감 및 주행 안정성 해석

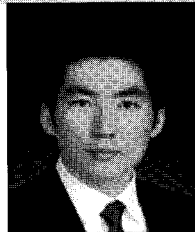
The Comfort and Stability Analysis of Bridge-high Speed Train(KTX) Interaction using XFINAS



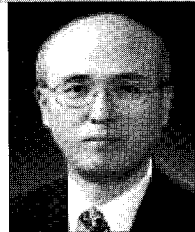
김기두*



김범준**



차재윤**



변윤주***

* 건국대학교 사회환경시스템공학과 교수
 ** 건국대학교 사회환경시스템공학과 대학원생
 *** (주) 동호 부사장

1. 개요

철도는 다른 교통 수단에 비해 승객과 화물의 대량 수송이 가능할 뿐만 아니라 시간단축, 안전성, 환경 친화성 등의 장점이 있지만 승객이 여객수송의 품질에 대해 최종적으로 평가한다는 점을 감안할 때 승차감의 평가와 향상은 필수적이다. 승차감이란 차량이 주행하는 동안 승객이 얼마나 편안함을 느끼는 지를 나타내는 지표이다. 이것은 주행 속도와 적재량 뿐만 아니라 수송 서비스 질을 분류하기 위한 중요한 계수이며 차량에 의해 발생하거나 승객이 느끼는 가속도의 정도를 가장 폭넓게 나타낸다.

철도 차량의 승차감은 일반적으로 다른 요인에 비해 상대적으로 큰 영향을 미치는, 차량에서 발생하는 진동을 사용하여 평가하며, 그 세기(크기)에 따라 승객이 느끼는 승차감이 결정된다. 철도차량에서 발생하는 진동은 현가장치(suspension), 휠/궤도 접촉(Wheel/Rail contact), 휠형상(wheel profile)과 같은 차량특성, 구동모터(Traction motor), 콤프레서(Compressor), 궤도의 조도(irregularity)이나 곡선부의 주행에 의한 급격한 흔들림(jolt), 경사각의 변화(열차의 기울어짐)와 함께 궤도의 기하학적 구조의 변화(평면선형, 캔트)로부터 발생하는 가속도의 변화(jerk) 등과 같은 특성 등에 따라 결정된다.

이렇게 결정되는 진동은 승객의 승차감을 악화시키고 차량에 장착된 각종 부품과 기기를 파손시키는 원인이 되기도 한다. 또한, 심한 진동은 고속철도 차량의 주행 안정성에 심각한 문제를 발생 시킬 수도 있다. 진동은 변위, 속도, 가속도 등으로 표현할 수 있으나 가속도를 많이 사용하고 있다. 차량의 동적 거동 아래에서 승객은 승객 자신의 몸무게와 관성모멘트를 가지기 때문에 힘이 승객의 몸에 계속적으로 작용한다. 이로 인해 승객에게 가속도에 대한 영향이 미치고 승객은 승차감의 정도를 느낄 수 있는 것이다. 승객에게 작용하는 차량 가속도에 의한 관성력은 그림 1과 같이 나타낼 수 있다.

가속도는 열차 주행 속도에 따라 측정된 열차 가속도를 사용하며, 이 가속도를 승차감을 위해 규정화된 허용 가속

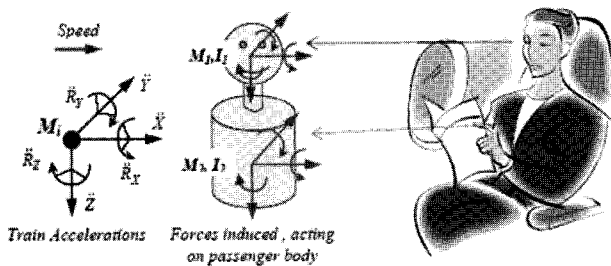


그림 1 승객에게 작용하는 차량 가속도에 의해 발생하는 관성력

도와 비교하여 승차감을 평가할 수 있다. 본 연구에서는 승차감 평가를 위해 XFINAS 구조 해석 프로그램(참고문헌 4,5,6)을 사용하여 KTX 열차 하중이 작용하는 V-Girder 철도 교량을 분석하였다. XFINAS 프로그램의 Dynamic analysis¹⁾ under Moving load를 이용해 교량과 차량의 상호 작용 해석(Bridge-Vehicle Interaction)을 수행하였고, 이를 통해 각 열차 속도에 따른 최대 가속도를 계산하여 고속철도 승차감을 위해 규정된 허용 가속도(KTX Criterion)와 비교 분석한다.

2. XFINAS 프로그램의 교량과 차량의 상호 작용 해석(Bridge-Vehicle Interaction)

XFINAS 프로그램은 KTX의 주행에 따른 차량의 구조적 안전성, 주행 안정성 및 승차감 측면에서 평가할 수 있는 차량/궤도/교량 상호작용을 고려한 교량의 3차원 동적해석을 할 수 있으며 차량/궤도/교량의 실질적인 모델링을 위하여 차량/레일 접촉 모델링을 위한 헤르쯔안 스프링 요소가 적용되어 있다. 3차원 교량과 열차의 상호 작용 해석은 최근에 개발된 고속 철도의 연구를 위한 목적으로 사용되고 있다. 3차원 교량과 열차 상호 작용 해석은

- 1) 열차 모델링 2) 교량 모델링 3) 열차와 교량의 인터페이스 모델링 4) 레일 조도의 선정 5) 교량과 열차의 상호 작용 문제 계산 6) 결과 해석(주행 안정성 & 승차감 평가)와 같은 요소들을 고려하여 시행 되어진다.

교량과 차량의 상호 작용 해석과 승차감과의 관계는 그

림 2와 같다.

레일의 조도를 고려해주기 위해서 XFINAS에서는 조도 모양에 대한 함수로 FRA(USA Federal Railway Administration)과 SCBF(French National Railway)에 따른 함수를 선택할 수 있는데 이번 해석에서는 FRA의 PSD 함수를 사용하였고 FRA에 따른 레일의 상태는 moderate, poor, very poor 중 moderate를 사용하였다.

3. V-Girder 철도 교량을 주행하는 KTX 예제

승차감 해석을 위해 단순 지지된 V-Girder 콘크리트 철도 교량을 사용하였다. 교량은 양 단부에서 힌지와 롤러로 지지되는 전체 길이 50m 단순보로, 단부에서 중앙부로 가면서 단면의 하부 두께가 변하는 Taper 단면을 가진다. 5개의 V-Girder 위에 상판이 지지되어 있고, 그 위에 레일이 설치된 구조로 레일에 가해지는 열차에 의한 시/제동하중, 수직하중 등이 상판을 거쳐 가로보와 거더로 전달되어 분산되는 구조이다. V-Girder 교량의 제원은 그림 3, 4와 같다.

XFINAS를 이용해 교량의 모델링을 위하기 위해서 1)Frame, 2)Shell&Frame 요소를 이용할 수 있다.

Frame 요소의 경우, 5개의 V-girder와 레일, 가로보 모델링을 위해 Frame 직선 요소로 나타내었고 상판은 Frame 격자형상을 이용하였다. Frame과 Shell 요소를 같이 이용한 경우는 5개의 V-girder와 레일, 가로보는 Frame요소로, 상판은 4절점 ANS(Assumed Natural Strain) Shell 요소(XShell-4-ANS)로 모델링하였다.

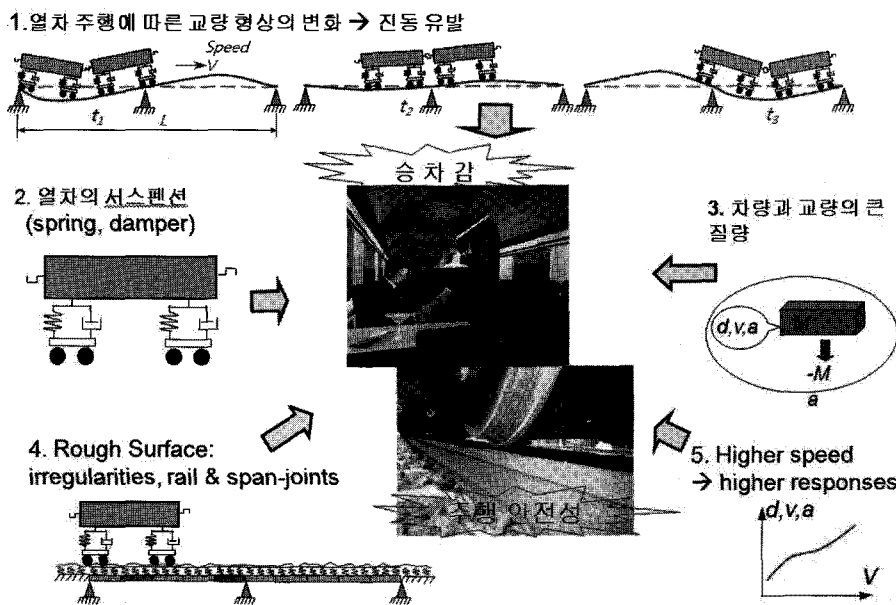


그림 2 교량과 차량의 상호 작용 해석 - 승차감

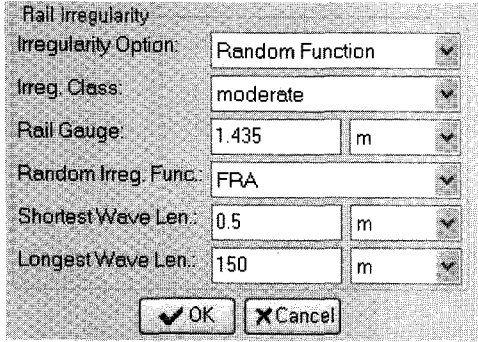


그림 3 레일조도 입력 창

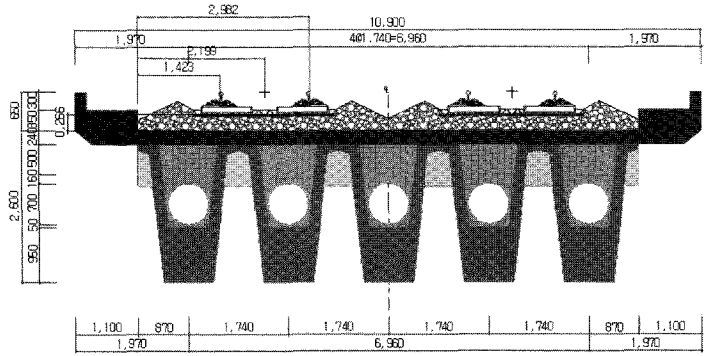


그림 4 V-Girder와 상판, 레일의 제원

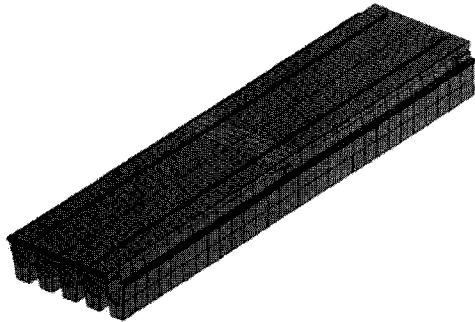


그림 5 Frame 요소 이용한 모델링

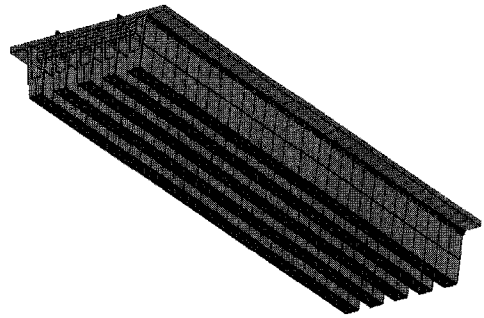
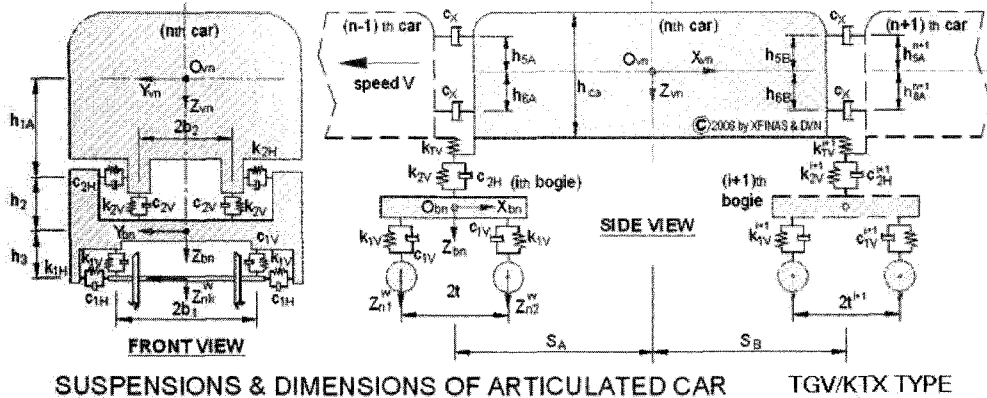
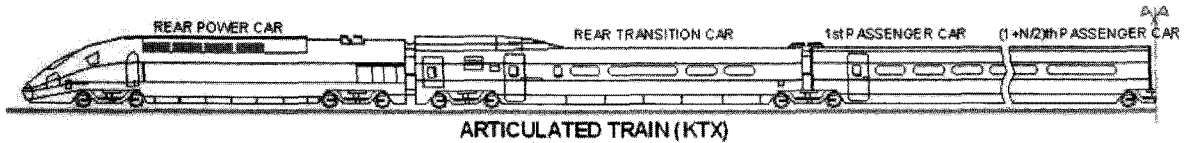


그림 6 Shell&Frame 요소 이용한 모델링

2) KTX 제원 및 모델링

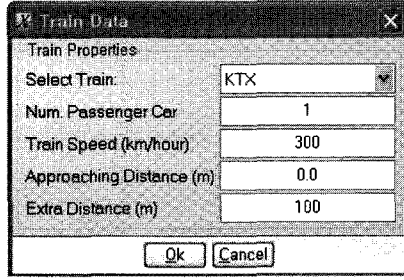
승차감 해석을 위해 일정한 속도로 교량 위를 주행하는 10개 차량(동력차 2대, 동력객차 2대, 객차 6대)의 KTX를 고려하였다. KTX는 Articulated Train 모델에 대한 제원과

서스펜션을 사용하여 모델링하였다. KTX는 동력차와 동력객차, 객차 세대로 구성되어 있어 차량에 따른 제원뿐만 아니라 세 가지 각각에 대한 Bogie와 바퀴의 제원도 다르기 때문에 모델링할 경우 각각을 고려하여야 한다. 따라서 XFINAS에서는 다음과 같이 제원을 고려할 수 있다.

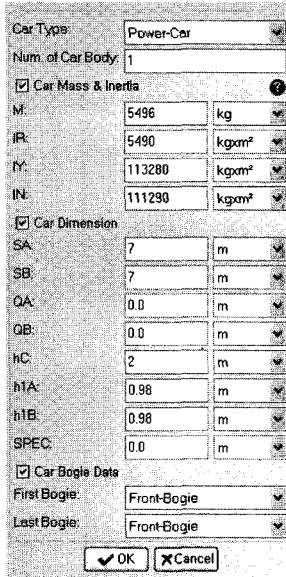


SUSPENSIONS & DIMENSIONS OF ARTICULATED CAR TGV/KTX TYPE

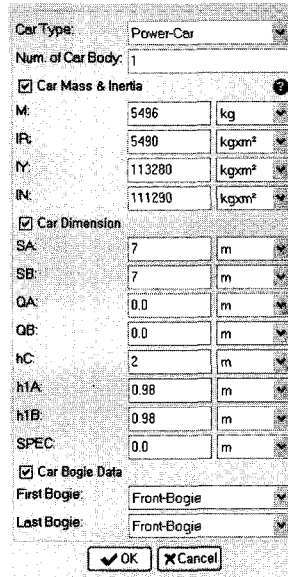
그림 7 Articulated car(KTX)에 대한 형상과 제원, 서스펜션



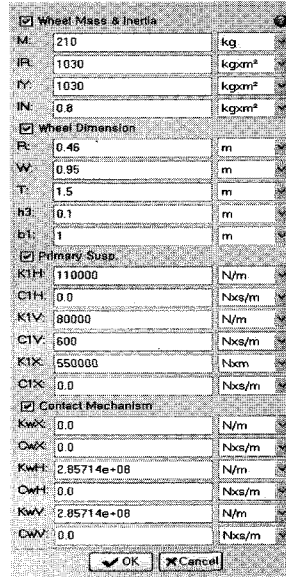
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 8 XFINAS에서 KTX 제원 자동 입력
(a) 열차 특성 입력 (b) Car-body 제원 입력 (c) Bogie 제원 입력 (d) 바퀴 제원 입력

4. XFINAS를 이용한 해석 & 열차 속도에 따른 열차의 최대 가속도 계산

XFINAS를 이용해서 교량과 열차의 상호 작용 해석을 할 경우, 교량의 응답(주행 시간과 속도에 따른 교량의 변위,

가속도)과 열차의 응답(주행 시간과 속도에 따른 열차의 변위, 가속도), 그리고 모든 바퀴에 작용하는 최대 축하중의 결과 값을 얻을 수 있다. 교량과 열차의 변위와 가속도의 경우, 측/수직방향에 대한 값을 얻을 수 있고 바퀴에 작용하는 축하중의 경우, 측/수직/가로 흔들림에 대한 값을 얻을 수 있다. 여기서, 고속철도 승차감에 대해 규정된 허용 가속도(KTX Criterion)와 비교 분석하기 위해 열차의 최대 측/수직방향 가속도와 교량의 최대 변위를 이용하였다.

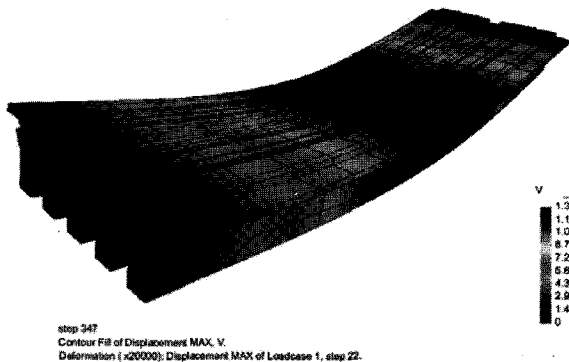


그림 9 열차 주행에 따른 교량의 변형 형상

5. 승차감 비교

승차감 비교 분석을 위하여 열차의 최대 측/수직 방향 가속도(Max.Lateral/Vertical acceleration), 경간 비에 따른 최대 교량 수직 변위(Δ_{max}/L)를 교량 허용 기준 (KTX Criterion)와 비교한 것이다. 다음은 열차속도-최대 측/수직 방향 가속도 그래프와 허용 기준 비교 결과표로, Frame과 Shell/Frame에 대해서 분석하였다.

표 1 Shell/Frame 해석

기준	KTX	XFINAS Results	
		Max. Response Acceleration	Location of peak
(4) Max.vertical acce. in car-body	$0.49m/s^2$	$0.304m/s^2$	9th Car
(5) Max.lateral acce. in car-body	-	$0.154m/s^2$	10th Car
(6) Δ_{max}/L (Max. bridge deflection to span length ratio)	1/1700	1/9430 ($\Delta_{max}=0.00318m, L=30$)	10th Car

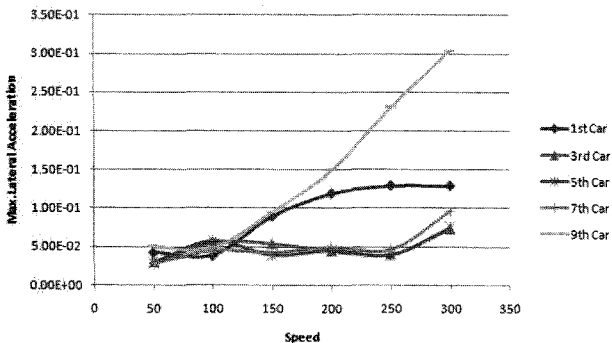


그림 10 속도-최대 측방향 가속도 그래프 예

6. 결 론

위 결과들을 종합해 보면, XFINAS에서 Frame과 Shell/Frame 요소를 이용하여 승차감 해석을 수행할 수 있음, KTX가 철도교를 주행 할 시 교량에 발생하는 승차감 및 주행 안정성을 평가할 수 있게 개발되었다. 또한 XFINAS로 해석할 시, 설계자가 얻어내고자 하는 결과 종류에 따라 그에 맞는 어느 요소를 사용하여도 수치해석시 솔루션의 안정적인 값을 얻을 수 있다.

참 고 문 헌

1. 김영국 등, 2003, “국내 고속철도 차량의 승차감에 대한 추정”, 한국철도학회, 제9권, 6호, pp.131~137
2. 김영국 등, 2007, “고속에서 한국형 고속철도 차량의 승차감 추정”, 한국철도학회 논문집 제10권, 제2호, pp.146~152
3. 김영국 등, “운행조건에 따른 한국형 고속열차의 승차감에 대한 고찰”, 한국철도학회, 제7권, 제1호
4. 딘반위엔 김기두 심재수 최은수 송삭, 철도-차량 상호 작용에 의한 3차원 동적해석 모델 개발, 한국 강구조학회, 2008년 2월, 제20 권 1호, 151-163
5. Van Nguyen Dinh, Ki-Du Kim, Pennung Warchai, “Dynamic analysis of three-dimensional bridge-high-speed train interactions using a wheel-rail contact model”, Engineering Structures Volume 31, Issue 12, December 2009, Pages 3090-3106
6. Van Nguyen Dinh, Ki-Du Kim, Pennung Warchai, “Simulation procedure for vehicle-substructure dynamic interactions and wheel movements using linearized wheel-rail interfaces, FINITE ELEMENTS IN ANALYSIS AND DESIGN, Volume 45, April 2009