요소 세분화를 이용한 비적합 미끄러지는 접촉문제의 개선과 철도 사각암거 문제에서의 적용

최 찬 용¹ · 여 인 호¹ · 정 근 영² · 이 계 희^{3*}

¹한국철도기술연구원 고속철도연구본부, ²KY Technology, ³목포해양대학교 해양 & 플랜트건설공학과

The Improvement of Incompatible Sliding Contact Problem Using Mesh Refinement And Its Application to Railway Skewed Culvert Problem

Chan-Yong Choi¹, In-Ho Yeo¹, Keun-Young Chung² and Gye-Hee Lee^{3*}

¹High-Speed Railroad Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute, Uiwang, 16105, Korea

²KY Technology, Suwon, 16324, Korea

³Ocean Engineering College, Mokpo National Maritime University, Mokpo, 58628, Korea

Abstract

The vehicle-track structure dynamic interaction analysis problem can be treated as sliding contact problem, and it is assumed that vehicle run at a constant speed over a rail modeled as beam elements. Unfortunately, Salome-Meca can not satisfy the compatibility condition for the beam master elements, which are consist of the elements with higher order polynomial shape function, in sliding contact problem. In this study, it is suggested to use more finer beam master element mesh as the remedy for incompatibility in sliding contact problem, and the accuracy of the solution is secured. For this, the effect of beam element mesh refinement consisting runway is analysed through simple examples, and the applicability to the dynamic interaction analysis is evaluated. Finally, the dynamic interaction analysis of railway skewed culvert transition problem is carried out to evaluate the effect of supporting stiffness due to backfill pattern changes and track irregularity due to uneven subgrade settlement.

Keywords : dynamic interaction analysis, salome-meca, sliding contact, track structure, skewed culvert transition

1. 서 론

차량의 주행에 따른 차량-구조물 동적상호작용해석을 수행하기 위하여 많은 연구가 수행되어 왔으며, 기존의 이러한 연구들은 주로 연구자가 직접 프로그램을 작성하여 동적상호작용 해석을 수행하는 경향이 있었다(Choi *et al.*, 2002; Kim, 2003; Kim, 2005). 예전에는 일부 범용해석프로그램을 제외하고는 차량-구조물 동적상호작용해석을 수행하기에는 미끄러지는 접촉문제(Sliding contact problem)의 해석기능이 부족한 경향이 있었으나, 근래에는 많은 범용 유한요소해석프로그램들에서 차량-구조물 동적상호작용해석을 수행함에 부족

함이 없는 것으로 판단된다. 범용 유한요소해석을 이용한 차량-구조물 동적상호작용해석을 수행할 경우, 연구용으로 작성된 해석프로그램에 비해 해석 및 결과분석의 편리성과 병렬처리(Parallel processing) 및 최적화된 솔버(Solver)에 의한 해석시간의 감소를 기대할 수 있다.

이 연구에서는 공개 범용 유한요소해석 프로그램을 이용하여 KTX 동력차가 사각을 갖는 암거 접속부(Skewed culvert transition) 구조물위를 주행함에 따른 암거접속부의 동적상호작용해석을 수행하고, 암거 접속부의 뒷채움재 형태에 따른 영향을 분석하고자 하였다. 동적상호작용해석에는 Salome-Meca 2016 프로그램이 사용되었으며, Salome-Meca는 유한요소

* Corresponding author:

Tel: +82-61-240-7314; E-mail: lghlsk@mmu.ac.kr
Received August 8 2017; Revised August 22 2017;
Accepted August 23 2017

©2017 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

해석프로그램인 Code-Aster에 전처리기(Pre-processor) 및 후처리기(Post-processor)가 포함된 공개 유한요소해석 프로그램이다(Aubry 2013, Thakore 2014).

범용구조해석프로그램을 이용한 차량-궤도 구조물 동적상호 작용해석에서는 차량의 접촉점이 보요소(Beam element)로 모형화된 레일 위를 일정한 속도로 주행하는 미끄러지는 접촉 문제로 취급할 수 있다. 하지만, Code-Aster의 경우 Euler 보와 같은 고차 다항식의 형상함수가 적용된 유한요소를 사용할 경우 미끄러지는 접촉문제에서 적합조건을 만족하지 못한다. 이러한 이유로 차량이 주행로를 이루는 레일의 절점을 지날 때마다 실제 문제에서는 발생하지 않는 충격거동이 발생하게 되며, 이로 인해 동적상호작용해석에의 해의 정확성을 감소시키고 심지어는 해석에 적용 불가능한 경우도 발생시킬 우려가 있다.

이러한 현상은 접촉여부를 판정하기 위하여 유한요소의 변형 형상(Deformed shape)을 결정할 때 고차의 형상함수를 사용하지 않고, 간단하게 선형 형상함수를 사용하여 유한요소의 변형형상을 결정함으로써 발생하는 현상에서 기인한 것으로 판단된다. 이러한 미끄러지는 접촉문제에서 적합조건과 관련된 문제를 해결하고자, Guillaume Drouet과 Patrick Hild (2017)의 LAC 방법(Local Average Contact method)의 도입이 제안되어 있으나 이러한 접근 방법은 고차의 등매개유한요소(Isoparametric finite element)가 사용된 미끄러지는 접촉문제의 해의 개선효과를 기대할 수 있었지만, 레일을 모형화하기 주로 사용되는 Euler 보요소의 경우 사용되는 형상함수가 3차 다항식으로 이루어진 Hermitian 형상함수이고 통상의 등매개유한요소와는 달리 회전자유도를 갖는 유한요소라는 점에서 LAC 방법이 Euler 보의 경우에도 해의 정확성을 향상시킬 수 있을 지는 의문이다.

본 연구에서는 이와 같이 적합조건을 만족하지 못하는 미끄러지는 접촉문제를 해결하기 위한 방안으로 주행로를 이루는 보요소의 크기를 충분히 작게 하여 유한요소 변위장보간(Displacement field Interpolation)에서의 발생되는 오차를 줄이고자 하였다. 우선 간단한 단순지지된 판형교(Plate girder bridge)를 대상으로 접근방법의 타당성을 평가하였으며, 철도 문제에서의 본격적인 적용을 위하여 콘크리트궤도 문제를 대상으로 주행로를 이루는 보요소의 요소의 세분화(Refinement) 정도에 따른 차량-구조물 동적상호작용해석 결과에의 영향을 살펴보았다.

마지막으로, 이렇게 정리된 동적상호작용해석기법을 철도 사각암거 접촉부 문제에 대하여 적용하였다. 해석에 사용된 사각암거 접촉부 문제는 뒤편채움의 형식을 변경할 경우 차량 주행에 따른 영향이 발생할 가능성을 살펴보고자 하였으며,

노반침하에 따른 궤도틀림의 유무에 따른 거동을 비교함으로써 사각암거를 갖는 접속부 단면의 시공성 및 경제성 측면에서의 개선가능성을 판단하고자 하였다.

2. 요소 세분화 방법을 통한 차량-구조물 동적상호작용해석의 개선

2.1 단순 지지된 판형교

간단한 단순지지된 교량상을 주행하는 차량문제를 대상(Fig. 1, Table 1~2)으로 세분화의 개선효과를 검증하였다. 이 문제는 철도교 판형교에 KTX 동력차의 1/4차량모델이 주행하는 문제를 간략화한 것이며, 문제의 간략화를 위하여 판형교 위에 부설된 궤도는 모형화하지 않았다. 따라서, 강제판형에 강제 차륜(Wheel)이 접촉하는 문제이므로 미끄러지는 접촉에서의 적합조건이 만족되지 않을 경우 실제 철도문제에 비해 큰 접촉력(Contact force)의 오차가 발생할 수 있는 예제이다. 차량모델에는 자중(Self weight)이 작용하고, 차량의 접촉점과 교량을 모형화하는 보요소간에는 접촉조건이 설정되었다. 차량의 경계조건은 교축방향의 자유도의 경우 주행속도에 따른 이동거리를 강제변위(Prescribed displacement)로 가하였고, 교축직각방향의 자유도는 구속하였다. 교량상을 주행하는 차량 모델은 교량의 왼쪽 끝에서 우측방향으로 100km/h로 주행하는 것으로 설정하였으며, 교량구조물의 감쇠비는 1.55696Hz와 6.12779Hz의 두 고유진동수를 이용하여 감쇠비 2%를 적용하여 Rayleigh 비례감쇠행렬을 구성하였다. Newmark 방법에 의한 시간적분에서 적분시간간격은 0.001초를 사용하였다.

Table 1 Physical properties of a vehicle model
(1/4 KTX power car model)

Physical property	Value
Carbody mass	13.740tonne
Bogie frame mass	1.212tonne
Wheelset mass	2.048tonne
Stiffness of primary suspension	$2.054 \times 10^3 \text{ kN/m}$
Damping of primary suspension	$3.200 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$
Stiffness of secondary suspension	$1.268 \times 10^3 \text{ kN/m}$
Damping of secondary suspension	$2.850 \times 10^3 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$
Contact spring stiffness	$1.500 \times 10^6 \text{ kN/m}$

Table 2 Physical properties of a plate girder bridge

Physical property	Value
Elasticity modulus	$2.1 \times 10^3 \text{ kPa}$
Poisson's ratio	0.3
Section area	$7.28 \times 10^{-2} \text{ m}^2$
Density of plate girder bridge	10.231 tonne/m^3

Fig. 1 Plate girder bridge problem for convergence test

차량-구조물 동적 상호작용해석은 두 가지 해석단계로 구분될 수 있다. 첫째는 차량의 초기상태(Initial condition)를 설정하기 위한 정적인 접촉해석(Static contact analysis) 단계이다. 두 번째 해석단계는 매시각마다 차량을 이동시켜가면서 동적인 미끄러지는 접촉문제에 대한 동적해석을 수행하는 해석단계이다. 정적인 접촉문제의 해석시 접촉이 발생하지 않은 차량이 정적으로 불안정한 구조물이 되므로 이를 방지하기 위하여 차량의 접촉스프링 강도의 10^{-7} 배만큼의 강성을 갖는 인위적인 스프링을 차량에 부착하여 정적인 안정성을 확보하였다(Fig. 2).

Fig. 2 Stabilization of initial static contact analysis stage

이 문제의 동적상호작용해석시 차량의 접촉점이 교량의 절점을 지날 때마다 의도하지 않은 충격이 발생하는 현상이 관측되었으며, 이를 감소시키고자 교량을 모형화하는데 사용한 보요소의 수를 점차적으로 증가시켰다. 대상교량은 보요소를 이용하여 4, 8, 16, 32, 64, 128개의 보요소로 모델링하여 동적상호작용해석을 수행하였으며, 주행로를 구성하는 보요소의 세분화정도에 따른 해의 수렴성을 평가하여 세분화에 대한 개선 효과를 평가하였다.

교량 중앙점에서의 연직변위의 시간에 따른 변화를 작도한 경우 교량을 모형화하는데 사용된 보요소의 수가 작은 경우에는 비정상적으로 출렁이는 변위시간이력 곡선이 얻어졌다(Fig. 3). 교량을 모형화하는데 사용되는 보요소의 개수를 증가시킬수록 이러한 현상은 감소되었으며, 보요소의 세분화에 따라 빠른 해의 수렴을 보였다. 교량을 128개의 유한요소로 모형화

(a) Time history

(b) Convergence of the solution

Fig. 3 Vertical displacement of bridge center node

(a) Time history

(b) Convergence of the solution

Fig. 4 Contact force of contact spring

하였을 때 연직변위의 최대값은 2.176mm였으며, 교량을 4개로 모형화한 MA4N-3D 프로그램(Jung *et al.*, 2006; 2012)

의 해석결과는 최대변위가 2.183mm이었다.

차륜 하부의 접촉스프링(Contact spring)에 작용하는 접촉력의 시간에 따른 변화곡선을 살펴볼 때 차량의 접촉점이 주행로를 이루는 절점을 지날 때마다 미끄러지는 접촉문제에서의 적합조건을 만족시키지 못하여 바람직하지 못한 충격이 발생하는 현상이 관측되었다(Fig. 4). 이러한 바람직하지 못한 충격현상은 주행로를 이루는 보요소를 보다 세분화할수록 작아지는 것으로 판단된다.

따라서 미끄러지는 접촉문제에서 적합조건을 만족하지 못하는 해석프로그램인 경우에도 주행로를 이루는 유한요소의 크기를 충분히 작게 세분화한다면 차량-구조물 동적상호작용 해석에의 적용이 가능하다고 판단된다.

2.2 콘크리트 궤도 구조물

이 예제에서는 콘크리트 궤도 성토구간을 40개의 침목구간인 26m만큼을 수치적으로 모형화하여 레일을 모형화하는 보요소의 침목구간당의 요소개수가 차량주행에 따른 동적상호작용해석 결과에 미치는 영향을 평가하였다(Fig. 5). 레일은 보요소로 모형화하고, 체결장치(Fastener)는 스프링(Spring)과 감쇠장치(Damper)를 이용하여 모형화하였으며, 기타 다른 궤도

구조물 부분은 모두 8절점 입체요소(8-node hexahedral solid element)를 이용하여 모형화하였다. 궤도구조물을 모형화함에 있어서 HSB 층을 포함한 윗부분과 강화노반층(Reinforced roadbed)을 포함한 아랫부분을 별도의 개별적인 부분으로 모형화하였으며, 두 부분이 맞닿는 부분은 제한조건식에 의해서 서로 부착된 거동을 하도록 하였다(Fig. 5, 6). 해석대상 구조물로 1/2궤도 모델이 사용되었으므로 KTX 동력차의 1/4모델인 Table 1의 값을 이용하여 1/8모델 차량모형을 구성하였다. 차량은 최초에는 좌에서 6.5m위치에 재하되고, 그 후 100km/h의 속력으로 13m거리를 주행하도록 하였다. 이 문제에서도 최초의 상태인 정적인 접촉문제에서의 차량의 정적인 불안정성을 방지하기 위한 매우 작은 강도를 가진 수치적 안정스프링을 차량의 접촉점 위치에 부착하였다.

콘크리트궤도로 이루어진 궤도구조물 및 노반을 Table 3에 나타낸 물리적 특성을 사용하여 수치적으로 모형화하였다. 궤도의 1/2 부분을 모형화함에 의해 발생된 경계면이나 강화노반, 상부노반(Upper subgrade), 하부노반(Lower subgrade) 및 원지반(Original subgrade)의 경계면에서는 면에 수직한 방향의 자유도를 구속하였으며, 레일의 양쪽 끝은 모든 자유도로 구속하는 경계조건을 가하였다.

동적해석에서 궤도구조물의 감쇠행렬은 4.262 Hz 및 6.173

Fig. 5 Concrete track problem for convergence test

Fig. 6 Finite element mesh for concrete track analysis

Table 3 Physical properties of concrete track

Category	Physical property	value
Rail	Elasticity modulus	$2.1 \times 10^8 \text{ kPa}$
	Poisson's ratio	0.3
	Density	7.997 tonne/m^3
	Cross sectional area	$7.750 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
	Moment of inertia	$3.090 \times 10^{-5} \text{ m}^4$
Fastener	Spring constant	$3.5 \times 10^4 \text{ kN/m}$
	Damping value	$5.0 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$
TCL	Elasticity modulus	$3.40 \times 10^7 \text{ kPa}$
	Poisson's ratio	0.2
	Density	2.5 tonne/m^3
HSB	Elasticity modulus	$1.290 \times 10^7 \text{ kPa}$
	Poisson's ratio	0.2
	Density	2.4 tonne/m^3
Reinforced roadbed	Elasticity modulus	$1.800 \times 10^5 \text{ kPa}$
	Poisson's ratio	0.2
	Density	2.00 tonne/m^3
Upper subgrade	Elasticity modulus	$1.000 \times 10^5 \text{ kPa}$
	Poisson's ratio	0.3
	Density	2.000 tonne/m^3
Lower subgrade	Elasticity modulus	$7.500 \times 10^4 \text{ kPa}$
	Poisson's ratio	0.3
	Density	2.000 tonne/m^3
Original subgrade	Elasticity modulus	$1.000 \times 10^5 \text{ kPa}$
	Density	0.3
	Poisson's ratio	1.9 tonne/m^3

(a) Time history

(b) Convergence of the solution

Fig. 7 Contact force of concrete track problem

(a) Time history

(b) Convergence of the solution

Fig. 8 Carbody acceleration of concrete track problem

Hz의 두 고유진동수를 이용하여 Rayleigh 비례감쇠행렬을 구성하도록 하였으며, 레일의 경우 1%감쇠비를 적용하고 TCL, HSB 및 허부노반에는 2%의 감쇠비를 적용하였다. 또한, 동적 해석에서의 Newmark 적분법에서 의한 시간간격은 앞의 예제와 동일하게 1/1000초로 설정하였다.

철도문제의 경우 레일에 체결장치(Fastener)를 연결하기 위하여 레일을 모형화하는 보요소의 크기가 침목간격(Tie spacing)인 0.65m보다 작거나 같다. 이 연구에서는 0.65m 길이인 침목구간 1개를 분할하는 보요소의 크기를 1, 2, 4, 8, 16, 32로 변화시켜가면서 동적상호작용해석을 수행하고 그 결과를 분석하였다.

차륜의 하부에 위치한 접촉스프링에서의 접촉력을 살펴본 결과 1개의 침목구간을 1개의 보요소로 모형화한 경우에는 윤중변동(Wheel load fluctuation)이 매우 크게 나타났으나, 1개의 침목구간을 2개 이상의 보요소로 모형화하는 경우에는 해가 동적상호작용해석에서의 오차가 크게 감소하는 경향을 보였다(Fig. 7). 보요소의 개수에 따라 접촉력이 수렴해가는 경향을 살펴볼 때 콘크리트 궤도 문제에서는 1개의 침목 구간에서 레일을 16개 이상의 Euler 보요소로 세분화한 경우에는 동적상호작용해석에서 안정된 해를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

차체의 가속도(Fig. 8), 중앙부 레일에서의 연직변위(Fig. 9) 및 중앙부 강화노반 상면에서의 수직응력(Fig. 10)의 경우

(a) Time history

(b) Convergence of the solution

Fig. 9 Vertical displacement of rail

(a) Time history

(b) Convergence of the solution

Fig. 10 Vertical stress on top of reinforced roadbed

에도 1개의 침목구간을 1개의 보요소로 모형화한 경우에는 동적상호작용해석의 오차가 매우 크게 나타났으나, 1개의 침목구간을 2개 이상의 보요소로 세분화한 경우에는 동적상호작용해석의 오차가 급격하게 감소하는 현상을 확인하였다. 이는 미끄러지는 접촉문제에서의 적합조건을 만족하지 못할 경우 가장 민감한 거동을 보이는 것은 접촉력이기 때문인 것으로 판단된다. 이 예제에서는 접촉력의 시간이력곡선에서 앞서의 교량문제에서와 같이 주행로상의 절점을 지날 때마다 급작스럽게 충격이 가해지는 현상은 관측되지 않았으나, 1개의 침목구간을 1개의 유한요소로 모형화한 경우에는 무시할 수 없는 정도로 큰 윤중변동을 야기하는 것으로 판단된다.

이상의 결과를 살펴볼 때 미끄러지는 접촉문제에서 적합조건을 만족하지 못하는 경우, 콘크리트 궤도구조물이 동적상호작용해석에서는 레일을 구성하는 보요소를 충분히 세분화할 경우 동적상호작용해석의 해의 정확성을 확보할 수 있고, 하나의 침목구간을 1개의 보요소로만 모형화할 경우에는 오차가 매우 크게 나타남을 확인하였다.

3. 사각을 갖는 암거 접속부의 동적상호작용해석에의 적용

앞 절에서 얻어진 개선방안을 적용하여 사각을 갖는 철도 암거 접속부 문제의 차량주행에 따른 동적상호작용해석을 수행

Fig. 11 Railway standard culvert transition with concrete track bed($1.3\text{m} \leq ER \leq 2.0\text{m}$)

Fig. 12 Two different culvert transition backfill patterns for numerical analysis

하였다(Fig. 11). 철도설계기준에서 제시하고 있는 사각 암거 박스 단면의 뒷채움(Backfill) 표준단면은 Fig. 12(a)와 같다. 복선 궤도(Double track)의 경우에는 표준단면과 같이 뒷채움채를 선로방향에 수직하게 설치하는 단면으로는 시공성 및 경제성의 확보가 곤란하다(KRRI 2006). 따라서 이 연구에서는 시공성 및 경제성 향상을 위하여 Fig. 12(b)와 같이 암거와 평행하게 뒷채움채를 설치한 경우에 차량주행에 따른 동적상호작용 효과에 의한 악영향이 나타날 위험성이 있는가를 평가하고자 하였다. 사각을 갖는 암거의 영향에 의해 의한 궤도의 평면성틀림(Twist track irregularity)을 고려하기 위하여 두 개의 레일로 구성된 1개의 궤도부분을 모형화하고, 3차원으로 모형화된 KTX 동력차량 1량이 주행하도록 하였다. KTX 차량의 수치해석모델은 집중질량(Lumped mass), 스프링(Spring), 감쇠장치(Damper) 및 강체연결(Rigid link) 등을 이용하여 다물체 동역학(Multibody dynamics)에 근거한 차량모델을 모사하도록 모형화되었다(Fig. 13).

이 예제에서는 1개의 궤도부분을 모형화하였으며, 3차원 KTX 동력차 1량을 재하하여 250km/h의 속력으로 주행하도록 하였다. 차량의 최초 재하위치는 첫 차량이 암거(Culvert) 중심위치에서 좌측방향으로 20m 떨어진 위치하도록 하였으며,

(a) Dimension of KTX power car

(b) Numerical KTX 3D model

Fig. 13 Numerical model for 3D KTX power car

Table 4 Physical properties of KTX power car

Physical property		Value
Mass of carbody(M_c)		54.96tonne
Center to center distance of bogies		14.00m
Mass of bogie frame(M_b)		2.424tonne
Mass of wheelset(M_w)		2.048tonne
Wheel base		3.00m
Mass moment of inertia of carbody(I_{cy})		$1.133 \times 10^3 \text{ tonne} \cdot \text{m}$
Mass moment of inertia of bogie frame(I_{by})		$2.593 \text{ tonne} \cdot \text{m}$
Primary suspension	spring(k_{pz})	$1.252 \times 10^3 \text{ kN/m}$
	damper(c_{pz})	$16.00 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$
Secondary suspension	spring(k_{sz})	$2.536 \times 10^3 \text{ kN/m}$
	damper(c_{sz})	$57.00 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$

그 후 우측방향으로 60m를 주행하도록 하였다. 동적상호작용 해석에서의 Newmark방법에 의한 시간적분간격은 1/1000초가 사용되었다. KTX 동력차를 모형화하면서 사용한 차량 각 부분의 물리적 특성은 Table 4에 나타난 값들과 기존 연구 자료(김준희, 2000)를 사용하였다. 궤도구조물을 모형화하는데 사용된 재료의 물리적 특성은 Table 3과 5에 나타난 값들을 사용하였다. 궤도부분은 160개의 침목구간으로 이루어진 104m의 구간을 3차원적으로 모형화하였으며, 레일 및 체결장치를 각각 보요소와 스프링/감쇠장치로 모형화하고, 나머지 부분들은 8절점 입체요소를 사용하여 모형화하였다.

두가지 뒷채움 형태에 대하여 해석대상구조물을 수치 모형화하였으며(Fig. 14), 노반의 침하로 인하여 발생하는 궤도틀림

(a) Standard backfill pattern case

(b) Modified backfill pattern case

Fig. 14 Skewed culvert transition finite element meshes

Fig. 15 Assumed rail vertical height variation due to subgrade settlement($d=0.01637\text{m}$)

Table 5 Physical properties of culvert and cement treated gravel

Category	Physical property	value
Culvert structure	Elasticity modulus	$2.442 \times 10^7 \text{ kPa}$
	Poisson's ratio	0.18
	Density	2.5 tonne/m^3
Cement treated gravel	Elasticity modulus	$1.000 \times 10^6 \text{ kPa}$
	Poisson's ratio	0.2
	Density	1.9 tonne/m^3

영향을 고려하기 위하여 삼각함수를 이용하여 노반침하에 의한 레일단면의 기하학적인 높이 변화를 설정하였다(Fig. 15).

차량 주행에 따른 철도 압거 접촉부의 동적상호작용해석을 수행하고, KTX 동력차의 주행방향의 우측 차륜 4개의 접촉력을 앞부분 차륜부터 순차적으로 추출하여 시간에 따른 접촉력의 변화를 살펴보았다(Fig. 16). 노반침하에 의한 궤도틀림이 없는 경우의 표준단면과 변경단면의 접촉부 구조물의 지지강성의 차이에 의해서만 발생하는 윤증변동율(Wheel load variation rate)은 최대 0.0276정도 수준(표준단면의 경우 0.028542이고, 개선단면의 경우 0.028548)이었으며 접촉부 뒷채움재 설치 형식에 따른 접촉력의 차이는 매우 미소한 편이다(Fig. 16a). 뒷채움재가 표준단면 형식으로 설치된 경우의 노반침하에 의한 궤도틀림의 유무에 따른 영향은 노반의 침하에 의한 궤도틀림을 가정한 경우에는 최대 윤증변동율이 0.368 수준으로 궤도틀림의 영향이 상당히 크게 나타났다(Fig. 16b).

차량주행에 따른 KTX 동력차의 차체 연직가속도의 경우 노반침하에 의한 궤도틀림이 없는 경우에는 최대연직가속도가 표준단면의 경우 0.0138m/s^2 이고 개선단면의 경우 0.124m/s^2 수준으로 지지강성차이에 의한 차체연직가속도의 변화는 작았다(Fig. 17a). 표준 접촉부 단면에서 노반침하에 의한 궤도틀림을 고려한 경우에는 차체의 최대 연직가속도가 0.660m/s^2 수준으로 증가하였다. 차량의 차체 가속도의 경우에도 접촉부의 뒷채움재 형식에 의한 지지강성의 변화에 의한 영향은 미소한 편이고, 노반침하에 의한 궤도틀림의 영향이 상대적으로 매우 크게 나타남을 확인하였다. 이러한 사실로부터 뒷채움재의 설치 형식에 따른 차량의 주행안전성 및 승차감의 저해 위험성은 거의 없는 것으로 판단되며, 접촉부 노반의 침하억제와 침하발생시 궤도틀림의 정정작업을 통하여 양호한 궤도품질을 유지하는 것이 더욱 중요한 것으로 판단된다.

차량의 주행에 따른 강화노반의 수직응력을 살펴보기 위하여 암거접촉부 구조물에서 강화노반의 응력이 상대적으로 크게 발생하는 뒷채움재 좌측 어깨부분의 궤도 중심위치에서의 수직응력을 관측하였다. 노반침하에 의한 궤도틀림이 없는 경우에는 최대 수직응력이 표준단면에서 22.974kPa 이고 변경단면에서 23.184kPa 로 0.194%정도의 거동이 증가하였으며, 암거 뒷채움재 설치 형식의 변화에 따른 지지강성변화 효과가 미소한 편으로 판단된다(Fig. 18a). 노반의 침하에 의한 궤도틀림이 존재하는 표준단면의 경우에는 최대 수직응력이 24.570kPa 로 나타났다(Fig. 18b). 노반침하에 의한 궤도틀림의 존재에 따른 동적상호작용해석결과를 살펴볼 때 차량의 거동은 궤도틀림에 큰 변화를 보이지만, 구조물 노반부에서의 거동은 6.947%정도 증가된 것으로 그쳤다.

중앙 궤도중심선위치의 강화노반 상면에서의 연직변위의 경우 표준단면의 경우 0.214mm , 변경단면의 경우 2.15mm 의 최대값이 관찰되어 뒷채움 형식에 따른 영향이 매우 작았다.

(a) No subgrade settlement assumption

(b) The effect of track irregularity

Fig. 16 Contact force of KTX power car(right hand side wheels)

(a) No subgrade settlement assumption

(b) The effect of track irregularity

Fig. 17 Vertical carbody acceleration of culvert problem

(a) No subgrade settlement assumption

(b) The effect of track irregularity

Fig. 18 Vertical stress on top of roadbed of culvert problem

(a) No subgrade settlement assumption

(b) The effect of track irregularity

Fig. 19 Vertical displacement on top of roadbed

표준단면의 암거접속부에 노반침하에 따른 침하를 고려한 경우에는 최대 연직변위가 0.209mm이었으며, 노반침하에 의한 궤도틀림이 없는 경우와 거의 비슷한 결과를 보였다.

이상의 결과들을 살펴볼 때 암거 접속부의 뒷채움재 설치에 따른 영향은 차량 및 노반의 거동에 미치는 영향이 매우 미소한 것으로 판단되며, 암거 접속부의 시공성 및 경제성 향상을 위해 변경된 단면이 충분히 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결 론

차량-궤도 동적상호작용의 해석에서 유한요소해석프로그램이 미끄러지는 접속문제에서 적합조건을 만족시키지 못하는 경우에는 주행로를 이루는 유한요소의 개수가 적을수록 해의 정확도가 저하될 위험성이 있다. 이를 해결하기 위하여 요소를 세분화하여 모델링한 결과 해의 정확성이 향상되는 것을 보였다.

특히 접촉력의 경우 다른 거동에 비해 주행로를 이루는 보요소의 세분화 정도에 따라 해의 정확도 차이가 크게 나타났다. 특히 콘크리트 궤도구조물의 경우 침목구간을 하나의 보요소로 모델링하는 경우 해의 신뢰도가 매우 낮은 응답을 보여 기피해야 할 모델링 방법으로 나타났다.

레일을 보요소로 모형화하는 경우에는 주행로를 이루는 요소들보다 세분화하더라도 대상 요소가 1차원적 선요소이기 때문에 요소의 세분화에 따른 자유도 증가는 세분화 정도에 선형비례하므로 모델의 크기는 크게 증가하지 않고, 궤도틀림을 고려하는 경우에는 보요소의 세분화에 의해 레일을 모형화하는 보요소의 좌표변화를 보다 엄밀하게 표현할 수 있다고 판단된다.

본 연구에서는 1개의 침목구간을 16개의 보요소로 모델링하여 충분히 정확한 해를 확보할 수 있다는 결론을 얻었고 이를 사각암거를 갖는 철도 접속부 동적해석상호작용에 적용하였다.

사각을 갖는 철도 암거 접속부의 동적상호작용해석을 수행하고, 접촉력과 차체기속도를 분석하여 본 결과 차량의 거동의 경우 접속부의 뒷채움재의 설치 형식에 따른 지지강성에 의한 동적거동의 차이는 매우 미소한 편이고, 노반침하에 따른 궤도틀림을 가정한 경우에는 궤도틀림에 의한 차량의 동적거동의 증폭현상이 두드러졌다. 따라서 뒷채움재의 설치 형식에 따른 차량의 주행안전성 및 승차감의 저해 위험성은 거의 없는 것으로 판단되며, 접속부 노반의 침하억제와 침하발생시 궤도틀림의 정정작업을 통하여 양호한 궤도품질을 유지하는 것이 더욱 중요한 것으로 판단된다. 노반의 거동의 경우에도 암거접속부의 뒷채움재 설치형식에 따른 영향은 미소한 것으로 판단되며, 노반의 침하에 의한 궤도틀림이 존재하는 경우의 차량의 거동은 궤도틀림의 존재에 큰 변화를 보이지만, 구조물 노반부에서의 거동은 6.947%정도 증가된 것으로 그쳤다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비지원 (16RTRP-B067919-04)에 의해 수행되었습니다.

References

- Aubry, J.P.** (2013) Beginning with Code_Aster, A Practical Introduction to Finite Element Method using Code_Aster Gmsh, and Salome, Framabook.
- Choi, S.L., Lee, Y.S., Kim, S.H., Kim, B.S.** (2002) Verified 20-car Model of High-speed Train for Dynamic Response Analysis of Railway Bridges, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 15(4), pp.693~702.
- Chung, K.Y., Koh, T.H.** (2012) Dynamic Interaction Analysis of Tilting Train and Curved Track, *J. Korean Soc. Railway*, 15(2), pp.162~171.
- Chung, K.Y., Lee, S.U., Min, K.J.** (2006) Simulation of Vehicle-Structure Dynamic Interaction by Displacement Constraint Equations and Stabilized Penalty Method, *J. Korean Soc. Civil Eng.*, 26(4D), pp.671~678.
- Dharmit, A.T.** (2014) Finite Element Analysis using Open Source Software, Moonish Enterprises Pty Ltd.
- Dharmit, A.T.** (2014) Intermediate Finite Element Analysis with Open Source Software, Moonish Enterprises Pty Ltd.
- Guillaume, D., Patrick, H.** (2017) An Accurate Local Average Contact Method for Nonmatching Meshes, *Numerische Mathematik*, 136(2), pp.467~502.
- Kim, J.H.** (2000) Earthquake Response Analysis of High-speed Railway Vehicles, Master Thesis, KAIST.
- Kim, M.C.** (2003) Development of a Quasi-Three Dimensional Train/Track/Bridge Interaction Analysis Program for Evaluating Dynamic Characteristics of High Speed Railway Bridges, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 16(2), pp.147~152.
- Kim, M.Y., Lim, M.H., Kwon, S.D., Kim, H.K., Kim, N.I.** (2005) Dynamic Interaction Analysis of Vehicle-Suspension Bridge Considering Flexural and Torsional Behaviors and Shear Deformation Effects, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 18(4), pp.361~372.
- Korea Railroad Research Institute** (2006) A Study of Development of KR Design Code for Transitional Zone between Earthwork and Bridge and Design/construction in Box Structure.
- Korea Railroad Technical Corporation** (2011) Track Maintenance Standards, Civil Engineering Division.

요 지

차량-궤도 구조물 동적 상호작용해석은 차량의 접촉점이 보요소로 모형화된 레일 위를 일정한 속도로 주행하는 미끄러지는 접촉문제로 취급하였다. 하지만 Euler 보와 같은 고차 다항식의 형상함수가 적용된 유한요소를 사용할 경우 미끄러지는 접촉문제에서 적합조건을 만족하지 못한다. 이 연구에서는 유한요소해석프로그램이 미끄러지는 접촉문제에서의 적합조건을 만족시키지 못하는 것에 대한 해결법으로 주행로를 이루는 보요소를 보다 세분화하여 동적상호작용해석에서의 정확성을 확보하고자 하였다. 이를 위해 간단한 예제들을 통해 주행로를 이루는 보요소의 세분화 정도에 따른 동적상호작용해석의 거동을 분석하였으며, 해석 프로그램의 동적상호작용해석에의 적용성을 평가하였다. 마지막으로 사각을 갖는 철도 암거 접속부의 뒷채움재 설치 형식에 따른 차량주행시의 거동을 평가하기 위하여 동적상호작용해석을 수행하고, 접속부 뒷채움재 형식의 변경에 따른 지지강성의 변화에 의한 영향과 노반침하에 따른 궤도틀림의 영향을 비교분석하였다.

핵심용어 : 동적상호작용해석, Salome-Meca, 미끄러지는 접촉, 궤도 구조물, 사각을 갖는 암거 접속부