
고속궤도 차량용 궤도의 동특성 해석을 위한 상세 모델링 방안 연구

A Study on Detail Modeling Process for the Dynamic Characteristic Analysis of Track Link for High Speed Tracked Vehicle

김태성*, 김정석*, 정필중*, 최종용*, 김민철*, 정웅상**, 강대곤**
* (주)LG전선, ** FunctionBay INC.

초 록

궤도 내구성 향상과 최적 설계 기준을 마련하기 위해서는 궤도 전체 및 각 부품에 대한 동특성 해석이 필요하나, 기존 궤도차량 해석 프로그램은 차량의 동특성 해석에는 유용하나 궤도 링크 자체의 동특성 평가는 미흡하다. 따라서 본 연구에서는 궤도차량 해석 프로그램인 Recurdyn HM module을 이용하여 전체 차량에 대한 동특성 거동을 해석하고, 이를 경계조건으로 하여 궤도 각 부품에 작용하는 동하중을 생성할 수 있는 상세 궤도 링크 모델을 구성하여 부가되는 하중 결과를 생성 및 검증하였다. 이러한 과정을 통해 궤도 각 부품에 걸리는 극한 하중 및 동 하중 이력을 생성하였다.

Abstract

For the durability and the design optimization of the track system, It is necessary to analyze a dynamic characteristic of High-mobility tracked vehicles and the part of track link. But The computer program for analysis of High-mobility tracked vehicles does not give us entire satisfaction. So in this study, a dynamic characteristic analysis of High-mobility tracked vehicles and the part of track link is preformed by using the multi-body dynamics model and detailed track link model. And then, the maximum dynamic load data at the part of track link can be produced by using the detailed track link model.

1. 서론

궤도차량은 그 특성상 차륜형 차량에 비해 비탈진 경사면이나 굴곡이 심한 노면길을 주행하는데 용이한 장점이 있으며 스프라켓으로 구동되는 궤도는 차체하중을 지지하고 차량이 주행하는데 필요한 추진력을 제공하며 주행시 지면으로부터의 충격을 1차적으로 흡수완화시키는 기능을 가지고 있다. 특히 스프라켓, 아이들러, 로드휠, 지지롤러를 둘러싸고 있는 궤도에 의해서 움직이는 차량이므로 궤도의 특성은 궤도차량의 기동에 중요한 영향을 미치게 된다. 궤도는 지면의 반력과 스프라켓의 구동력 때문에

운용조건과 운동환경에 따라 인장력과 압축력 및 비틀림 하중 등 복합하중을 받게된다. 또한 궤도는 고무부싱과 핀 사이에 비틀림 현상이 일어날 뿐만 아니라 궤도차량이 굴곡이 심한 노면 주행시 궤도가 노면을 따라 굽어지면서 인장, 압축, 비틀림이 동시에 일어난다. 따라서 궤도차량의 동역학적 거동에 대한 실험 및 연구는 궤도운동과 접촉의 복잡성으로 인해 많은 어려움을 가지고 있다.

기존의 궤도차량에 관한 연구는 국방 과학 연구소(ADD)를 중심으로 활발하게 연구되어져 왔으나 차량의 동역학적 해석과 현가 시스템의 모델링 기법에 관한 것이 대부분으로 주어진

차량 시스템의 동적 반응을 실제와 비슷하게 나타낼 수 있는 있는 모델링과 해석 기법을 찾는 연구가 주로 수행되어 왔다. 또한 부분적으로 궤도에 대한 연구가 수행되어져 왔으나 이는 궤도 장력의 추정과 로외에서의 견인력의 추정 등 제한적인 연구만이 이루어져 왔을 뿐이다. 따라서 다양한 운용조건과 지면 조건하에서의 궤도의 동적 거동에 대한 연구는 아직 미약한 수준에 머물러 있다.

하지만 소요 군은 궤도차량에 대해 높은 생존성과 고기동성을 요구하고 있으므로, 궤도의 경우 내구성의 확보와 더불어 경량화를 위한 최적화 두 가지의 상반된 요구를 받고 있다. 따라서 설계 최적화와 내구성 향상을 이루는데 있어 궤도의 동 특성에 대한 정확한 해석과 각각의 운용조건에 따른 동하중의 예측, 그리고 극한 하중과 피로하중에 대한 확보는 필수적이라 할 수 있다. 이러한 궤도의 동특성 해석을 위해 본 사는 동역학 해석 프로그램인 Recurdyn을 이용하여 궤도차량에 대한 동적 거동 해석을 수행해 왔다. 하지만 기존의 동역학 프로그램은 차량 자체의 거동을 해석하는데에는 어려움이 없으나 해석의 용이성을 위해 궤도를 근사적으로 처리함으로써 궤도 각 부품의 동 특성 해석에는 한계를 가지고 있다. 따라서 궤도 각 부품의 동적 거동 특성을 해석하기 위해서는 상세 모델링된 궤도의 동적 해석방법이 요구되고 있다.

따라서 본 연구는 본 사가 개발하고 생산하고 있는 궤도의 동적 특성을 해석하기 위한 기존의 동역학 해석 프로그램인 Recurdyn이 가지고 있는 이러한 단점을 개선하고 궤도의 동적 거동을 해석하기 위하여, 기존의 궤도 해석 프로그램의 결과를 이용하여 궤도 상세 모델링 기법을 통하여 궤도의 동적거동을 예측할 수 있는 해석 기법을 개발하고자 한다.

2. 궤도차량의 동역학 모델

(1) 궤도 차량 모델링

본 연구에서 다루는 궤도차량 모델은 현재 군에서 운용하고 있는 MBT급 궤도차량을 대상으로 하였다. 시뮬레이션 모델은 샤시

부시스템과 2개의 궤도 부시스템으로 구성되며 샤시 부시스템은 샤시 스프라켓, 지지롤러, 아이들러, 로드암, 로드휠, 현가장치를 포함하고 있다. 스프라켓, 지지롤러, 로드암은 revolute 조인트에 의해 샤시와 연결되어 있다. 궤도 부시스템은 샤시 부시스템과 접촉력을 통하여 상호 작용하고 궤도 부시스템에서 인접한 강체는 컴플라이언트 힘요소로 연결되어 있다. 그림 1a)와 1b)는 구성되어진 샤시 부시스템과 궤도 부시스템의 모식도이다.

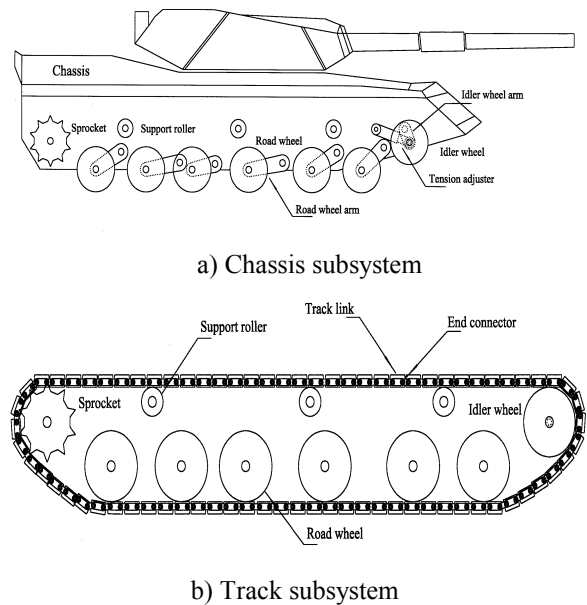


Fig. 1 Tracked vehicle model

구성된 샤시 시스템의 Cartesian과 조인트 공간 사이의 속도관계는 다음과 같이 표현된다.

$$Y = B\dot{q}_i \quad 1)$$

여기서 Y, B 그리고 q_i 는 각각 Cartesian 속도, 속도변환 행렬, 샤시 부시스템에 대한 상대 독립좌표를 나타낸다. 속도 변환법을 이용한 샤시의 운동 방정식은 다음과 같다.

$$B^T = MB\ddot{q}_i = B^T(Q - M\dot{B}\dot{q}_i) \quad 2)$$

여기서 M 은 샤시 시스템의 질량 행렬이고 Q 는 샤시 시스템의 외력 벡터이다. 샤시 부시스템과 궤도 부시스템 사이에 기구학적 연관성이 없기 때문에 샤시 부시스템과 궤도

부시스템에 대한 운동 방정식은 다음과 같이 분리된 형태로 다시 쓸 수 있다.
먼저 샤시 부시스템은

$$M_i^c \ddot{q}_i = Q_i^c \quad (3)$$

여기서

$$M_i^c = B^T M B, \quad Q_i^c = B^T (Q - M \dot{B} \dot{q}_i) \quad (4)$$

과 같이 표현되며, 궤도 부 시스템의 경우에는

$$M' \ddot{q}' = Q' \quad (5)$$

표현된다. 여기서 M' , q' , 그리고 Q' 는 각각 궤도 부시스템의 질량 행렬, 일반좌표, 힘벡터를 나타낸다. 결론적으로 샤시 부시스템과 각 궤도 링크의 가속도는 수식 3)과 5)에 의해 각각 얻어진다. 질량 중심 좌표 시스템이 각 궤도 링크에 사용되기 때문에 궤도 링크의 질량행렬은 대각(diagonal) 행렬이 된다.

궤도차량에 설치된 현가장치는 Hydro-pneumatic Suspension Unit(HSU)과 Torsion bar 현가 시스템으로 이루어져 있으며 이 시스템들은 실험적으로 구해진 컴플라이언스 특성을 갖는 힘 요소로 모델링 되어졌다. HSU와 Torsion bar의 강성계수와 감쇄계수는 류한식 등^(1,2)이 제시한 값을 사용하였다. 또한 궤도가 받는 접촉력과 궤도 부시스템에서 인접한 궤도들 사이의 컴플라이언스 힘을 모델링에서 표현하기 위하여 각각의 접촉력에 대한 강성계수와 감쇄계수를 박 동창 등^(3,4)이 발표한 논문의 실험값을 참고하였다.

이상과 같은 과정으로 구성된 고속 MBT에 대한 다물체 동역학 모델은 189개의 강체와 36개의 revolute joint, 152개의 bushing 요소를 가지는 954 자유도를 가진 모델로 구성되었다. 그림.2는 구성된 다물체 동역학 모델을 보여준다.

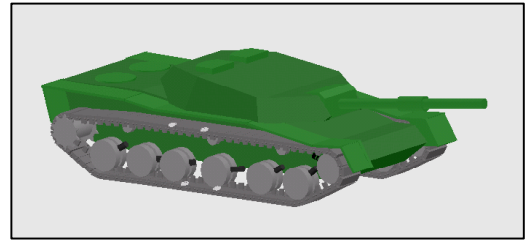
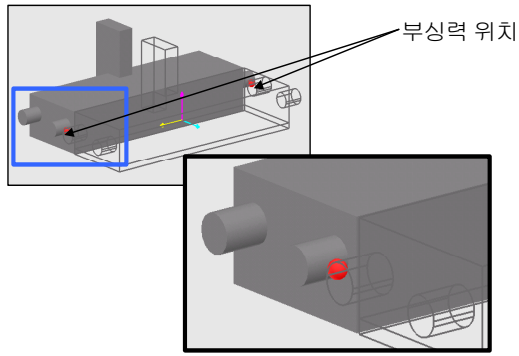


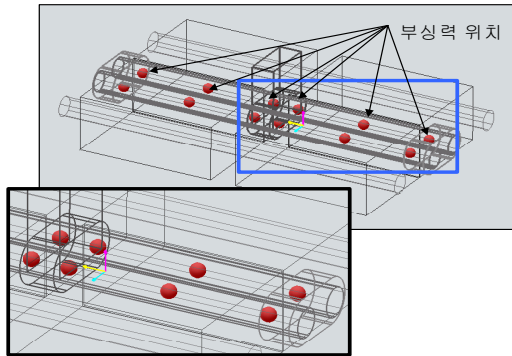
Fig. 2 Multi-body dynamics simulation model

(2) 궤도 상세 모델링

궤도 상세 모델링은 위의 차량 모델링에서 근사화된 모델을 실제 동사가 개발하고 있는 패드 교환형 궤도 모델과 같게 더블 핀에 two body 타입으로 모델링을 수행하였다. 다만 전체 모델링을 수행할 경우에는 각 part 의 수와 접촉조건이 많은 관계로 인하여 해석의 어려움이 있으므로 궤도 5 조에 대해 수행하였다. 먼저 궤도 핀에 걸리는 궤도 장력을 해석하기 위하여 궤도차량 모델링의 경우 궤도 좌우 각각 하나의 등가 부싱 force 로 모델링 하였다. 따라서 궤도 장력의 전체 크기는 알 수 있지만 핀에 걸리는 장력의 분포는 알지 못하는 단점을 가지고 있다. 따라서 상세 모델링의 경우에는 궤도 핀에 걸리는 하중을 정확하게 묘사하기 위하여 각 궤도 좌우에 6 개씩 총 12 개의 핀부싱을 모델링 하였고 각 부싱의 강성 계수와 감쇄 계수는 전체 등가 강성계수와 감쇄 계수의 1/n 배로 부과하였다. 그림 3 은 궤도 차량 해석 모듈에서의 부싱 force 의 위치와 상세 모델링에서의 부싱 force 의 위치를 나타낸 것이다.



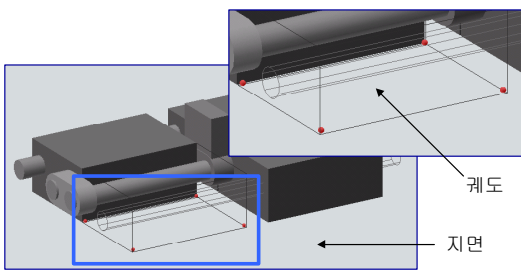
a) Multi-body dynamics simulation model



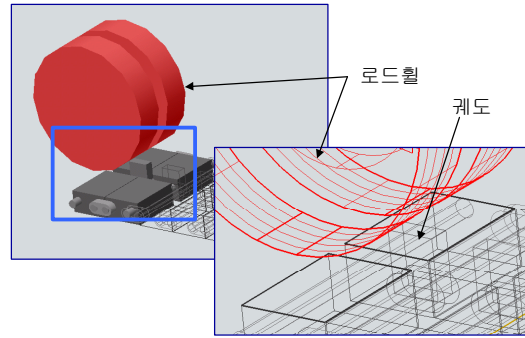
b) Detailed track link model

Fig. 3 Track pin bushing force modeling

또한 그림4는 지면과의 접촉과 로드휠과의 접촉을 나타낸 것으로써 지면과의 반력을 구하기 위하여 그림 4 a)와 같이 dummy body를 이용하여 지면과의 반력을 구하였으며, 로드휠과의 접촉 반력의 분포를 구하기 위하여 로드휠을 다음 그림 4 b)와 같이 모델링하였다.



a) Contact between track pad to ground



b) Contact between roadwheel to track

Fig. 4 Contact condition modeling

또한 그림 5에서는 궤도 5조에 대해 상세 모델링된 상세 모델링된 모델을 보여준다.

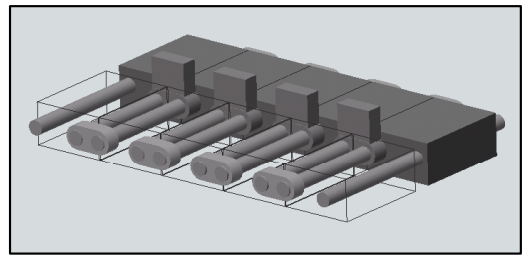
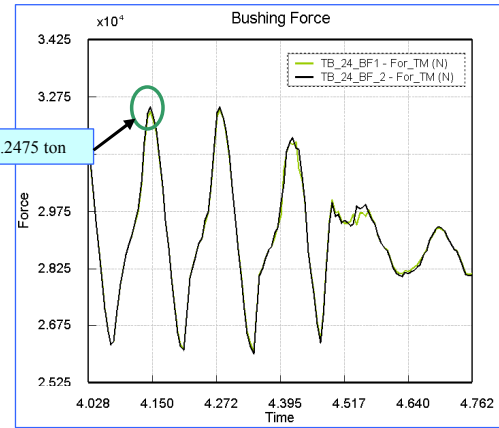
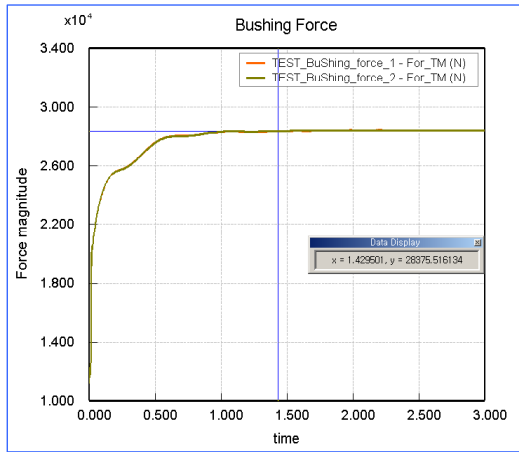


Fig. 5 Detailed track link model

3. 모델 검증 및 해석 결과

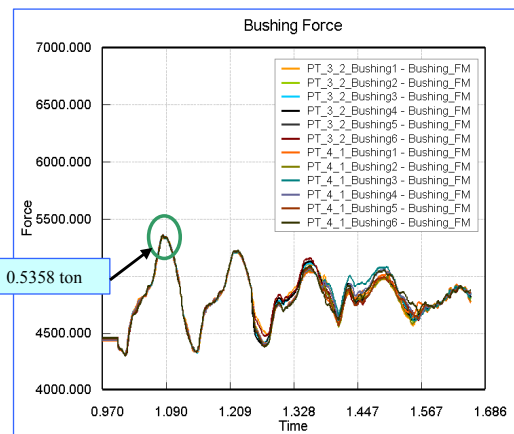
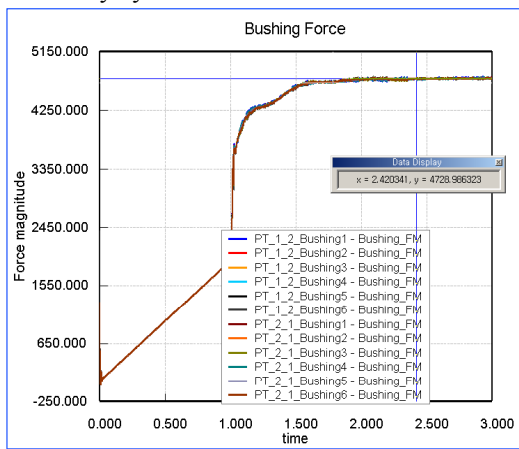
해석은 Recurdyn HM module에서 전체 궤도차량 모델링의 해석 결과 나온 궤도1번 및 5번의 위치와 자세 및 로드휠의 위치와 자세의 spline 곡선을 구하여 이를 Recurdyn 프로그램의 cmotion을 이용하여 상세 모델링에 부과하였으며 상세 모델링 해석 결과는 boundary condition에 영향을 받지 않는 3번째 궤도의 결과를 이용하였다.

먼저 구성된 상세 모델링을 검증 하기 위하여 궤도 차량 모델의 정지 상태에서 나온 차량 중량에 대한 궤도의 초기 장력과 상세 모델의 정지 상태에서 나오는 차량 중량에 대한 초기 장력 결과를 비교하였다. 그림 6은 두 결과 값을 비교한 것이다.



a) Multi-body dynamics simulation model

a) Multi-body dynamics simulation model



b) detailed track link model

b) detailed track link model

Fig. 6 Track tension result

Fig. 7 Track tension result

그림에서 알 수 있듯이 상세 모델의 궤도 장력 값을 모두 더하면 전체 궤도 차량 모델의 장력 결과값과 잘 일치하며 고속 MBT급 궤도 차량의 초기 장력값과도 일치한다. 따라서 상세 모델링은 초기 안정 상태를 잘 표현하고 있음을 알 수 있다.

다음으로 등속 5km/h의 속도로 차량이 주행 중일때 궤도에 걸리는 하중을 비교해 보았다. 그림 7은 궤도 차량의 주행속도가 5km/h일때 두번째 로드휠을 궤도가 지날때 궤도 장력을 비교한 것이다.

상세 모델링의 경우 각각의 boshing force에 걸리는 하중이 0.53ton이므로 6개를 합하면 3.2148ton으로 궤도차량 모델의 값 3.2475ton과 거의 일치하며 그 경향 역시 유사함을 알 수 있다. 또한 로드휠이 지나갈 때에 핀에 걸리는 하중을 상세모델링에서는 그림 8과 같이 구할 수 있었다.

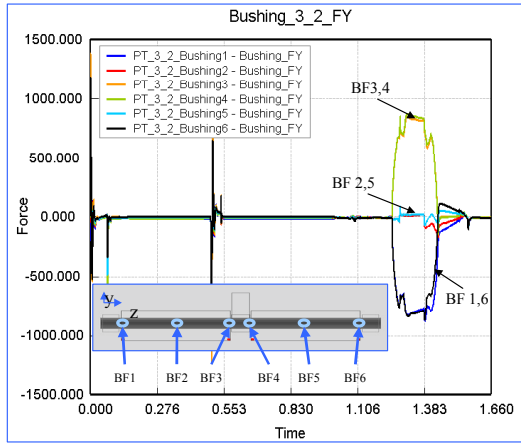
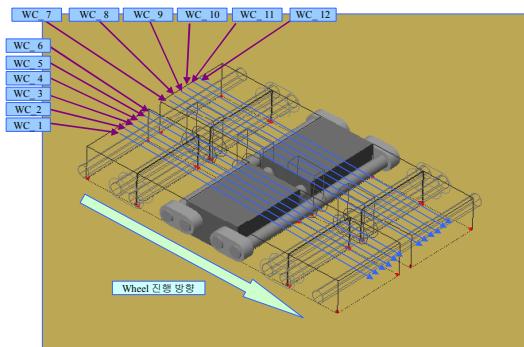
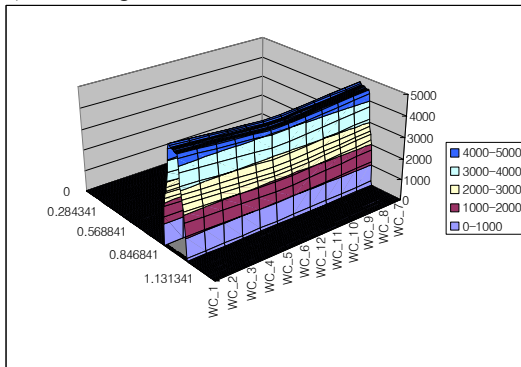


Fig. 8 Bushing force result

그리고 로드휠과 궤도와의 접촉 응력의 경우 궤도 차량 모델링의 경우 궤도의 중심에 대한 값으로 나와 전체의 접촉 거동을 알 수 없는데 반하여 상세 모델링의 경우 그림 9와 같이 접촉 시 로드휠의 가장자리로 갈수록 접촉 하중이 증가하는 분포 양상을 알 수 있었다.



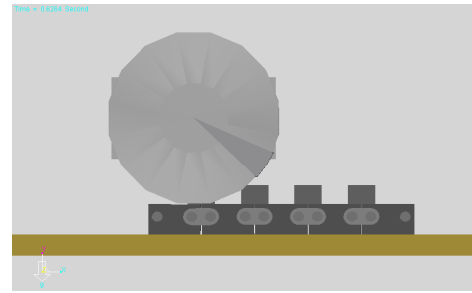
a) Contact point between road wheel to track link



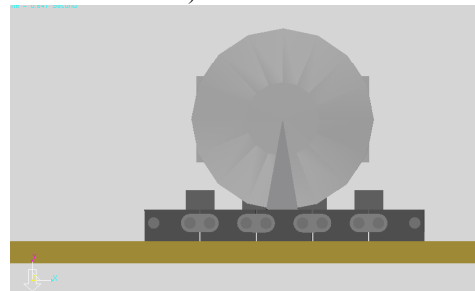
b) contact force

Fig. 9 Contact force between roadwheel to track link

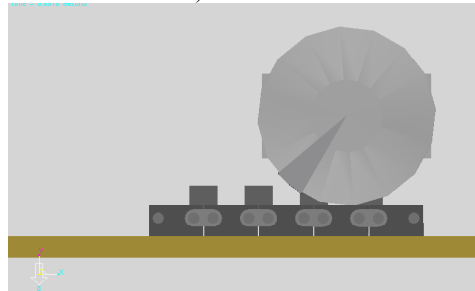
이상과 같은 결과를 토대로 상세 모델링 기법을 적용하면 궤도 차량 모델에서는 생성하지 못하였던 로드휠과 궤도의 접촉 하중의 분포 및 궤도 핀의 하중 분포를 구할 수 있으므로 구조해석 시 보다 정확한 값을 구할 수 있게 되었다. 그림 10은 시간에 따라 2번째 로드휠을 통과하는 상세 모델 궤도의 위치변화를 시뮬레이션 한 결과를 나타낸 것이다.



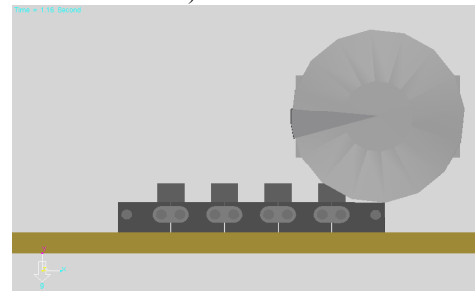
a) 0.6264 sec



b) 0.841 sec



c) 0.9318 sec



d) 1.16 sec

Fig. 10 Animation for detailed track link model result

6. 결론

이상의 연구를 통해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 다물체 동역학 해석 모델 및 상세 모델링 기법을 이용하여 고속 궤도차량의 운용조건에 따른 궤도 각 부품에 걸리는 하중 data를 추출할 수 있는 방법을 개발하였다.
2. 개발된 상세 모델링 기법에서 구한 결과는 궤도 차량 모델의 결과 및 시험 결과와도 잘 일치하였다.
3. 상세 모델의 경우 궤도 차량 모델에서는 구할 수 없었던 wheel에 의한 핀에 걸리는 하중의 영향을 구할 수 있었다.
4. 로드휠과 궤도와 의 접촉 하중은 로드휠의 중앙부 보다는 바깥쪽으로 갈수록 커지는 경향을 나타내었다.

참고문헌

1. H.S.Ryu,D.S.Bae," A compliant track link model for high-speed,high-mobility tracked vehicles,"Int.J.Numer.Meth.Engng,2000;48:1481-1502.
2. 김상두, "고속 주행용 궤도차량의 동적," 한양대 석사학위 논문, 1998.
3. 박동창외 3인," 고속궤도차량 궤도들간의 강성 및 감쇄계수에 대한 실험적 연구,"한국자동차공학회, 1997.
4. 김종수 외3인,"고속궤도차량의 로드휠과 궤도의 접촉 강성 및 감쇄계수에 대한 실험적 연구,"한국자동차공학회,1997.