

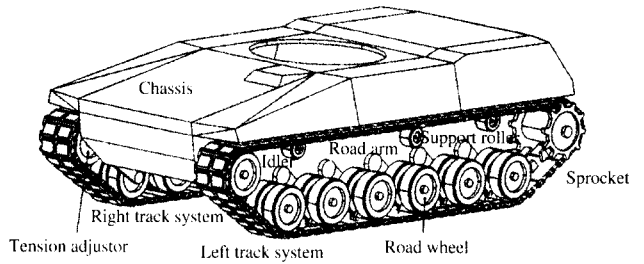
궤도차량 트랙 시스템의 가상시제 동역학 모델링



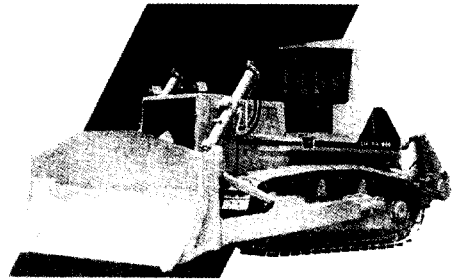
최진환
경희대학교
기계산업시스템 공학부

1. 서론

궤도차량(tracked vehicle)은 일반적인 차륜형 자동차와 달리 스프로킷(sprocket), 아이들러(idler)와 로드휠(roadwheel)을 감싸고 있는 궤도에 의해 움직이게 된다. 따라서 궤도의 특성은 궤도차량의 거동에 중요한 영향을 미치게 된다.



(a) 고속 궤도차량



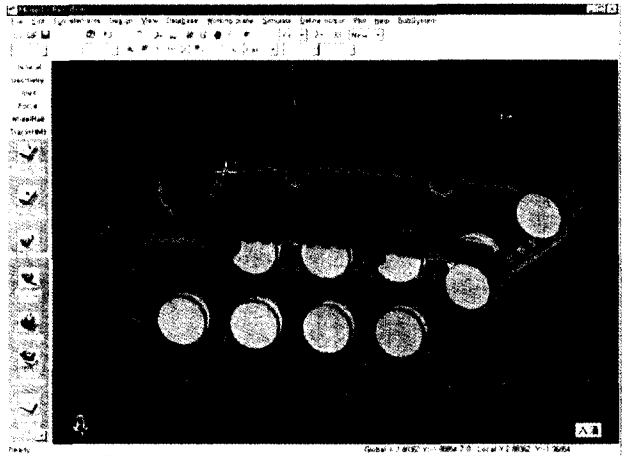
(b) 저속 궤도차량

<그림 1> 고속 및 저속 궤도차량 모델

20세기 초 궤도차량이 소개된 이후 궤도차량이 가지고 있는 고유한 특징, 안정성(stability), 기동성(mobility) 및 강한 추력(traction force)등으로 인해 농업용, 건설중장비 및 군용 전투차량으로 널리 보급되어왔다. 일반적으로 궤도차량은 두 그룹으로 나눌 수 있는데 설계중점을 안정성에 맞추느냐, 기동성에 맞추느냐 하는 것이다. 저속 궤도차량은 흔히 건설장비나 농업용 장비에 사용되는 반면에 고속 궤도차량은 주로 군사적 목적으로 개발되어진다. <그림 1>은 고속 및 저속 궤도차량의 대표적 모델을 보여준다

이러한 궤도차량의 궤도시스템은 주로 경험 및 단순한 공학적 계산에 의해서 설계, 제작되어 왔으나 최근 들어 컴퓨터 H/W 및 수치해석의 비약적 발전과 더불어 컴퓨터 가상시제 시뮬레이션에 의한 설계가 가능하게 되었다. 궤도시스템의 시뮬레이션 기술은 1980년대 중반이후부터 본격적으로 시작되었다.

건설장비나 농업용 장비에 사용되는 저속 궤도차량은 미국의 Caterpillar Inc. 그리고 일본의 Komatsu Ltd. 에서 고속 궤도차량은 미국의 전차연구소(TACOM) 산하 TARDEC 에서 세계최초로 2차원 시뮬레이션 기술이 개발되었다. 3차원 시뮬레이션 모델은 본인이 미국에서 학위 중 일본 Komatsu 와 TACOM의 지원 하에 저속 궤도차량을, 국방과학연구소 재직



<그림 2> 리커시브 다이나믹스사의 고기동 궤도차량 모델

시 고속궤도차량 가상시제 모델을 세계최초로 개발하였다.

궤도차량에 대한 과거의 연구 대부분은 다중 휠(multi-wheel)로 구성된 차량모델로 가정되어 해석되었다.

그 이유는 궤도와 차량 구성품들간의 접촉과 관련된 이론이 복잡하고, 이러한 복잡한 모델의 해석을 뒷받침할 수 있는 뛰어난 연산능력을 가진 컴퓨터가 필요로 되기 때문이다.

현재는 두 회사, 한국의 리커시브 다이나믹스(주) 그리고 미국의 MDI(ADAMS)에서 상업용 프로그램으로 개발하여 판매하고 있으나 아직은 많은 문제점을 내포하고 있다.

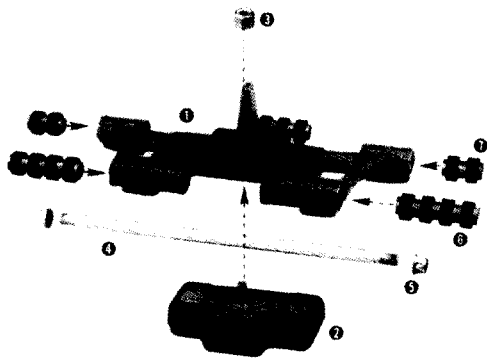
<그림 2>는 리커시브 다이나믹스사의 고기동 궤도차량 가상시제 동역학 모델을 나타낸다.

수많은 몸체로 구성된 궤도차

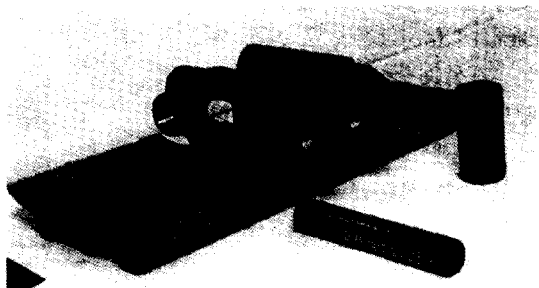
량의 궤도 시스템 해석에는 수백개의 비선형 미분대수방정식의 수치해가 필요하다. 궤도들은 회전이음(revolute joint) 또는 부싱(bushing)으로 연결된 링크들로 구성된 폐연쇄(closed loop)로 나타낼 수 있다.

각각의 궤도링크들은 고속으로 회전하면서 스프로킷, 롤러, 아이들러 와 간헐적으로 접촉하면서 추진력을 전달한다. 이러한 과정을 시뮬레이션 하기위해서는 전산동역학에서 가장 어려운 다음 세가지 수치적 문제들을 동시에 해결 하여야 하며, 궤도 시스템 동역학 모델링은 다음 세가지의 모든 수치적 문제점들을 동시에 포함하고 있다.

- (1) High speed problem
- (2) High stiff problem
- (3) Discontinuity problem



(a) 고속 궤도 차량용 궤도



(b) 저속 궤도 차량용 궤도

〈그림 3〉 고속 및 저속 궤도 차량용 궤도 링크

2. 궤도의 동역학적 모델링

서론에서 언급한 바와 같이 궤도차량은 그 목적에 따라 고속 궤도차량과 저속 궤도차량으로 구분되며 적용되는 궤도 링크 또한 그 목적에 적합하도록 설계되어진다. 〈그림 3〉의 (a)는 고속궤도 차량용 궤도를 나타내며, 몸체(shoe body), 핀(pin), 고무 부상(rubber bushing) 그리고 고무패드(rubber pad)로 구성 되어져 있다.

〈그림 3〉의 (b)는 저속궤도 차량용 궤도를 나타내며, 링크(link), 몸체판(shoe plate), 핀(pin) 그리고 부상(bushing)으로 구성 되어져 있다. 궤도시스템의 동역학적 모델링은 각각의 궤도를 하나의 강체로 모델링하여 부상힘(bushing force) 또는 회전이음(revolute joint)으로 연결하여 구성할 수 있으나, 고속궤도

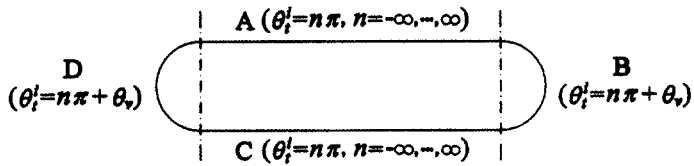
차량용 궤도는 고무 부상의 과도한 비선형 변형으로 인해 회전이음으로는 모델링 되어지기 어렵다.

2.1 회전이음(Revolute joint)에 의한 모델링

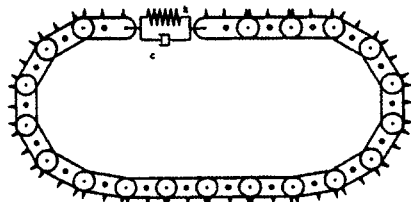
회전 이음에 의한 궤도 체인 시스템의 모델링은 주로 저속궤도차량 모델링에 사용되며 부상힘의 비선형(nonlinear), 고강성(high stiffness), 고주파(high frequency) 성분에 의한 수치해의 어려움을 피할 수 있으나 Augmented formulation을 사용할 경우 회전이음의 구속 방정식(constraint equation)으로 인한 또 다른 수치적 어려움이 발생된다. 이러한 구속 기구학 방정식(recursive formulation) 또는 속도변환법(velocity transformation)으

로 어느 정도 해결할 수 있으나 궤도 체인의 수가 매우 많을 시에는 이러한 기법으로도 모델링하기 어렵다.

참고로 회전이음으로 연결된 궤도시스템은 특이형상(singular configuration)이 나타나는데 특이형상은 폐 연쇄 때문에 발생하게 된다. 이런 경우 독립 좌표를 계속해서 바꾸어 줌으로서 특이형상을 피할 수 있다. 〈그림 4〉의 (a)에서 보여주는 것과 같이 종속각들이 동시에 A 또는 C의 영역을 지날때 특이형상을 나타내게 된다. 그러나 종속각들이 동시에 B 혹은 D영역을 지나거나 하나는 B 혹은 D 다른 하나는 A 혹은 C의 영역에 있다면 항상 일정한 양의 각을 가지는 θ_v 로 인하여 특이형상은 나타나지 않는다. 이러한 궤도의 기구학적 형상을 이용하여 독립 좌표와 종속좌표를 순환시킴으



(a) Singular configuration



(b) Secondary joint

〈그림 4〉 회전이음에 의한 특이현상 회피 법

로써 특이현상을 피하게 된다. 특이현상을 피하기 위한 또 다른 방법은 〈그림 4〉의 (b)와 같이 임의의 2차 이음(secondary joint)에서 chain을 잘라서 spanning tree structure를 형성한다. 2차 이음에서의 연결조건은 강성계수와 감쇠계수를 포

함하는 secondary joint force 나 cut joint를 이용하는 방법이 있다.

2.2 부싱힘(Bushing force)에 의한 모델링

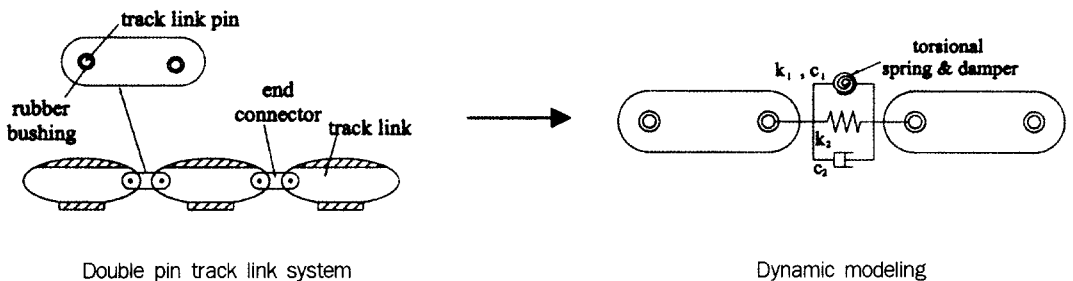
쉬운 운동방정식 그리고 간편한 컴퓨터 프로그램 작업으로 인

해 부싱힘에 의한 궤도 링크들의 연결은 궤도시스템의 동역학 모델링 시 저속궤도차량에서 조차 자주 사용되는 방법이다.

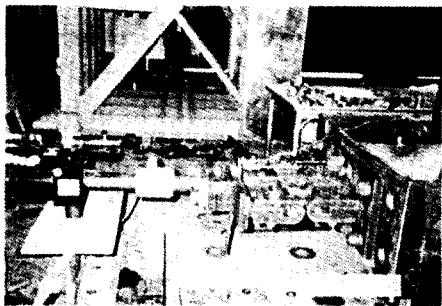
〈그림 5〉는 고속궤도 차량용 이중 핀 궤도의 부싱에 의한 동역학 모델링을 보여준다. 일반적으로 고속궤도 차량용 궤도는 핀과 궤도몸체(shoe body) 사이에 고무 부싱을 압축하여 삽입하므로 궤도들간 비선형적 변형이 상대적으로 많아 회전이음(revolve joint)으로는 모델링하지 않는다.

이러한 부싱힘에 의한 궤도시스템의 동역학 모델링은 다음과 같은 몇 가지 문제점을 내포하고 있다.

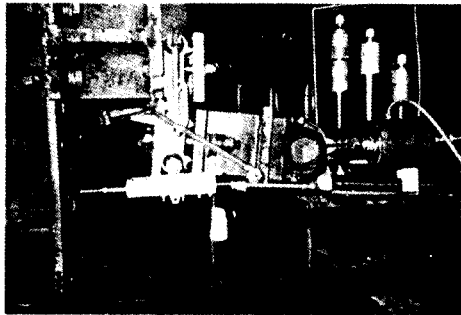
- (1) 부싱힘 모델의 고주파, 고강성 특성의 컴퓨터 수치적 문제
- (2) 부싱 강성 및 감쇠 계수들의 주파수 그리고 amplitude에 따른 비선형성
- (3) 고속주행 시뮬레이션 결과의 신뢰성 저하



〈그림 5〉 부싱힘 의한 궤도링크의 동역학 모델링



(a) 길이 방향에 대한 실험



(b) 비틀림 방향에 대한 실험

〈그림 6〉 궤도 부상 특성에 대한 실험

궤도의 부상힘 모델링을 하기 위해서는 부상의 동역학 특성, 강성 및 감쇠계수를 구해야 한다. 궤도가 운동하는 각 방향에 대한 정적 또는 동적 실험은 다섯 방향으로 수행되어야 하며 이는 원주방향, 축방향 그리고 3축에 대한 회전 운동이다. 원주방향 그리고 회전축방향 회전에 대한 실험은 치구 제작등이 용이하나 나머지 3 방향은 그 특성을 측정하기가 매우 까다롭다.

〈그림 6〉은 길이방향(radial) 및 비틀림(torsional) 방향에 대한 부상특성 측정 실험을 나타낸다. 궤도의 길이방향에 대한 정적, 동적특성을 구하기 위해 궤도의 end connector 부분과 측면에 strain gage를 부착하여 실험을 수행하였다. 정적특성실험은 2mm/min의 정하중 속도로 약 10 ton까지 압축하중을 가하였으며 길이방향의 변위를 측정하기 위해 center guide부

분에 LVDT를 부착하여 궤도의 중심변위를 측정하였다. 동적특성실험은 정적하중을 가한 상태에서 주파수를 10-50 Hz의 범위에서 5 Hz씩 증가시키면서 각 하중마다의 변위와 변동하중을 측정하였다. 실험을 통하여 얻어진 부상 특성을 궤도시스템의 컴퓨터 모델에 삽입하여 시뮬레이션을 수행한 결과 매우 정확한 결과를 도출할 수 있으나 부상 강성계수의 가진 주파수 의존성으로 인해 고속 시뮬레이션시 해의 정밀도가 현저히 저하된다. 그러나 최근의 연구발표에 따르면 가진 주파수에 독립적인 모델링이 가능해 이러한 문제점이 많이 개선될 수 있다.

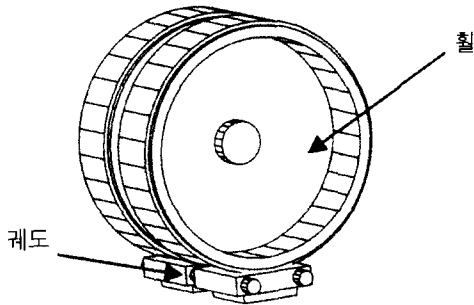
3. 궤도와 차체 구성 품 간의 접촉 모델링

〈그림 1〉에서 보여주는 바와 같이 스프로켓(sprocket), 아이

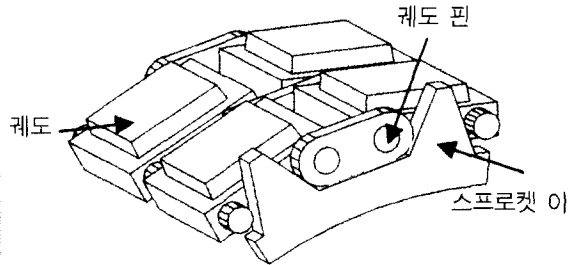
들러, 로드휠 및 롤러등을 둘러싸고 있는 궤도는 지면으로 지지반력과 추진력을 전달하며 현수 장치의 일부로서 지면으로부터의 충격을 1차적으로 흡수하여 완화시키고 하중을 분포시키는 기능을 갖고 있다. 궤도 시스템은 차체 시스템의 구성 품들, 롤러, 아이들러, 스프로켓, 및 이탈방지 구성 품들과의 접촉에 의해 운동이 통제된다. 궤도의 접촉 문제는 크게 다음의 세 가지로 구분할 수 있다.

- (1) 궤도와 로드휠, 아이들러, 롤러와의 접촉
- (2) 궤도와 스프로켓 이와의 접촉
- (3) 궤도와 지면과의 접촉

궤도와 지면과의 접촉문제는 본 글에서 강조하는 궤도의 동역학 모델링과 다소 거리가 있어, 궤도와 로드휠, 아이들러, 롤러와의 접촉, 궤도와 스프로켓 이와의 접촉 문제에 대해서만 알아



〈그림 7〉 케도와 로드휠의 접촉



〈그림 8〉 고속케도 차량용 케도 핀과 스프로킷 이들의 접촉

보기로 한다.

고속케도차량과 저속케도차량의 케도 접촉에 관한 한가지 중요한 특징은 저속케도차량의 경우 허츠안(Hertzian) 접촉 이론으로 해석이 가능하고 고속케도차량의 경우는 비허츠안(Non-Hertzian) 접촉 해석으로 분석될 수 있다.

그 이유는 저속케도차량의 경우 탄성체인 steel to steel 접촉이고 고속케도차량의 경우는 케도와 스프로킷 이와의 접촉을 제외한(일반적경우) 나머지 접촉은 고무와 steel로 몰딩된 복합체의 접촉이기 때문이다. 저속용 케도차량 중에서도 고무밴드 트랙을 장착한 케도차량은 고속용과 마찬가지로 해석 될 수 있다. 본 글에서는 고속용 케도는 고무로 몰딩된 것으로, 저속용 케도는 steel 로만 구성된 것을 일컫는다.

3.1 로드휠, 아이들러, 롤러의 케도링크의 접촉

케도 링크와 롤러 사이의 상호 작용은 그 기하학적 형태에 따라 여러 경우를 고려한다. 첫번째는 롤러와 케도링크가 접촉하지 않았을 경우이며 이때는 롤러와 케도링크 사이의 접촉력은 존재하지 않는다.

두번째는 케도링크와 롤러가 접촉하였을 경우이며 이때는 롤러에 작용한 접촉력은 케도링크에 작용한 힘과 크기는 같고 방향은 반대이다. 시뮬레이션시 어떤 강체들이 접촉해 있으며 또한 접촉점이 어디인지를 결정하기 위해서는 차량 모델에서 모든 롤러와 케도링크들의 위치에 관한 정보가 필요하게 된다.

예를 들어 〈그림 7〉에서 보여 주듯이 고속케도 차량용 휠은 견고하게 연결된 2개의 휠로 구성되어 있다. 휠과 케도 상호작용에 대한 5가지 가능성이 있다.

첫번째 가능성은 롤러의 두 휠이 케도 링크와 접촉이 일어나지 않는 경우이다. 이 경우에 접촉력은 작용하지 않는다. 두번째 가능성은 케도링크와 롤러의 한 휠이 접촉될 때 일어난다.

케도와 롤러에 작용하는 접촉력은 크기는 같고 힘의 방향은 반대이다. 세번째 가능성은 롤러의 양 휠과 케도링크가 접촉될 때 일어난다.

이 경우에 2개의 집중 접촉력은 롤러와 케도 링크에 작용한다. 네번째와 다섯번째 가능성은 한 휠 또는 양 휠이 케도 링크의 가장자리 접촉되는 경우에 일어난다.

3.2 스프로킷 이와 케도링크 핀의 접촉

케도차량은 엔진의 동력이 스프로킷을 회전시켜 스프로킷 이 와 케도 핀의 접촉력이 케도 시스템을 구동하여 지면의 마찰력

과 상호 작용하여 기동을 하게 된다. 이러한 궤도차량의 구동 메커니즘을 정확히 모델링 하려면 스프로킷 이빨과 궤도 링크 핀의 정확한 형상이 입력 되어야 하며 복잡한 기구학적 표현으로 이들의 접촉현상을 모델링 할 수 있다.

스프라켓 이(tooth)와 궤도 링크 핀 사이에 상호작용의 공간적인 접촉력을 표현하는 데는 많은 이빨 표면을 필요로 한다.

스프라켓과 궤도 링크사이엔 맞물림을 보여주는 <그림 8>에서 보듯이 몇몇 스프로킷 이는 궤도 링크 핀들과 맞물릴 수 있다.

접촉조건은 스프로킷 이빨 표면에서 궤도 링크 핀의 반경이다. 직교 좌표계가 각 이빨면에 대하여 도입된다. 면 좌표계는 선택된 스프라켓 좌표계에 대하여 일정한 자세를 갖는다.

따라서 한 면에 대한 좌표계의 자세는 2개의 좌표변환 행렬들

을 이용하여 관성 좌표계로 정의될 수 있다. 그 중 1개는 일정하고 1개는 시간에 따라 변하는 스프라켓의 회전 행렬이다. 스프라켓 원점의 직교 좌표와 좌표 변환을 이용하여 각각의 이빨 표면의 위치는 관성 좌표계로 정의될 수 있다.

또한 궤도 링크 좌표계를 이용하여 궤도 링크 핀 중심의 전역 위치벡터를 정의할 수 있다.

이 벡터와 이빨 표면의 전역 좌표는 스프라켓 이에 대한 궤도 링크 핀의 위치를 결정하는데 사용 되어진다.

스프라켓 이에 대한 궤도 링크 핀의 상대 위치는 궤도 링크 핀이 스프라켓 이의 한 면과 접촉이 일어나는지 일어나지 않는지를 결정하는 접촉 알고리즘으로 판단한다. 이러한 많은 접촉면과의 접촉력 해석은 많은 계산시간을 요구하기 때문에 다양한 최적화 기법이 종종 응용된다.

4. 맺음말

궤도차량의 동역학해석에 있어서 궤도의 강제 동역학 모델링은 오랫동안 대학이나 기업체에서 연구의 대상이 되었으나 최근에 들어서야 본격적으로 연구가 진행되고 있다.

이는 동역학 해석의 가장 어려운 세 가지 문제 즉, High speed problem, High stiff problem, Discontinuity problem을 궤도차량이 동시에 복합적으로 포함하고 있기 때문이다. 그러나 안정적 수치 적분 알고리즘, 효율적 운동방정식 그리고 최적화된 접촉 모듈로 인해 궤도차량의 가상시제 기술이 급격이 발달 되리라 예상된다.

본 글은 궤도차량을 두 가지 관점, 고속용 및 저속용으로 구분하여 현재까지 개발된 방법 중 가장 신뢰성 있는 해석 기법에 대하여 살펴 보았다.

<최진환: jhchoi@nms.kyunghee.ac.kr>