

궤도차량의 직진주행시 궤도장력 감지

허건수*, 조병희**, 서문석***, 서일성***, 박동창***
(1999년 8월 12일 접수)

Track Tension Monitoring in the Longitudinal Traveling of Tracked Vehicles

Kunsoo Huh, Byunghee Cho, Moonsuk Suh,
Ilsung Seo and Dongchang Park

Key Words : Track Tension(궤도장력), Tracked Vehicle(궤도차량), Monitoring(감지), Estimation(추정)

Abstract

The track tension is closely related to the maneuverability of tracked vehicles and the durability of tracks and suspension systems. In order to minimize the excessive load on the tracks and to prevent the peel-off of tracks from the road wheels, it is required to maintain the optimum track tension throughout the maneuver. However, the track tension cannot be easily measured due to the limitation in the sensor technology, harsh environment, etc. In this paper an indirect track tension monitoring system is developed based on idler assembly models, a geometric relation around the idler, and the tractive force estimated by using the Extended Kalman Filter. The performance of the tension monitoring system is verified with the results obtained from the Multi-Body Dynamics model.

기호설명

- M: 궤도차량의 질량
- I_z : 궤도차량의 질량관성모멘트
- A: 트랙요소의 면적
- B: 트랙의 폭
- v_x, v_y, r : 직진속도, 횡속도, 요잉속도
- T_{li}, T_{ri} : 궤도와 지면사이의 직진방향 전단력
- Q_{li}, Q_{ri} : 궤도와 지면사이의 횡방향 전단력
- σ : 운동저항계수
- C: 지면의 점착도
- ϕ : 마찰각
- k: 전단변형계수
- s: 궤도 슬립
- L: 궤도 접지 길이
- N_{ji} : j 쪽 트랙의 i 번째 요소의 수직응력
(j = r(오른쪽) or l(왼쪽))
- γ_{ji} : j 쪽 트랙의 i 번째 요소의 트랙 슬립각

1. 서론

국내의 고속 궤도차량(high mobility tracked vehicle)은 무게가 약 50 톤이며 60km/h 이상 주행할 수 있는 제 3 세대 전투탱크이다. 궤도차량은 새시 부시스템(chassis subsystem)과 2 개의 궤도 부시스템(track subsystem)으로 구성되어 있다. 새시 부시스템은 새시, 스프로킷(sprocket), 지지롤러(support roller), 아이들러(idler), 로드암(road arm), 로드휠(road wheel), 현가장치를 포함하며 스프로킷, 지지롤러, 로드암은 레볼류트 조인트(revolvute joint)에 의해 새시와 연결되어 있다. 궤도 부시스템은 슈 강체(shoe body), 핀, 고무 부상, 고무 패드로 구성되어 있다. 고무 부상과 핀은 반경방향의 압력을 받으며 슈 강체의 구멍으로 삽입되고 고무 패드는 슈 강체가 지면과 상호작용하는 부분에 부착되어 진다.

궤도차량은 일반적인 자동차와 달리 스프로킷, 아이들러와 로드휠을 감싸고 있는 궤도에 의해 움직이게 된다. 따라서 궤도의 특성은 궤도차량의

* 회원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : khuh2@email.hanyang.ac.kr

TEL : (02)2290-0437 FAX : (02)2295-4584

** 대우자동차

*** 국방과학연구소

거동에 중요한 영향을 미치게 된다. 일반적으로 궤도차량에서 기동성을 향상시키기 위해 로드휠 행정을 크게 하고 엔진 마력을 증가시키는데, 이로 인해 궤도의 처짐이 빈번히 발생하고 심할 경우 스포로킷으로부터 궤도가 이탈하게 되어 기동 자체가 불가능해질 수 있다. 한편 궤도 이탈을 방지하기 위해 궤도장력을 증가시키면 궤도와 현수장치 구성부품에 과도한 응력을 발생시켜 손상을 초래할 수 있다. 그러므로 궤도의 이탈이나 파손을 방지하고 안정한 주행을 하기 위해서는 적절한 궤도장력을 유지하는 것이 필요하다.

일반적인 궤도차량에서는 아이들러에 연결된 수동형 유압 궤도장력조절기에 의해 적절한 궤도장력이 유지된다. 장력조절기는 차량 무게의 10% 정도의 초기장력이 주어지며 예를 들면 포장도로, 야지, 피보팅(pivoting)과 같은 모드를 가지게 된다. 포장도로에서는 마찰에 의한 동력 손실을 최소화하기 위해 궤도장력을 최소로 하고, 야지에서는 궤도장력을 증가시켜 궤도와 지면사이의 견인력을 높여 준다. 궤도차량의 운전자는 경험에 근거하여 각 상황에 적당한 모드를 결정하게 된다. 그러나 이러한 결정이 궤도의 이탈이나 파손과 같은 중대한 문제를 야기시킬 수도 있다. 그러므로 위와 같은 한계를 극복하기 위해서 능동형 궤도장력조절기 개발이 이루어지고 있다.

이와 관련하여 간접적인 능동형 장력조절기에 대한 두 가지 방법만을 관련논문에서 찾을 수 있었다. 첫번째 방법은 아이들러와 근접한 로드암을 기계적 장치를 이용하여 연결하여 구성하였다.⁽³⁾ 궤도장력을 고려하지 않고 아이들러의 위치가 로드휠의 위치에 의해서만 결정되어진다. 두번째 방법은 계산된 궤도길이(Track Path Length)에 근거하여 Oakely 등⁽⁶⁾에 의해 개발되어졌으며, 계산된 궤도길기와 적정궤도길이를 비교하여 유압 액추에이터를 이용하여 아이들러의 위치를 제어한다. 위의 두 방법은 궤도장력 제어를 위해 궤도장력에 대한 정보를 사용하지 않으므로 간접 능동형 장력조절기로 분류되어야 한다. 이것은 궤도차량이 야지와 같은 거친 환경에서 주행시에 궤도장력을 측정하는 것은 한계가 있기 때문이다. 능동형 궤도장력 제어를 실현하기 위해서는 실시간 궤도장력 정보가 필요하다. 그러나 보고된 관련 연구 논문이 거의 없는 실정이다.

이에 본 논문에서는 측정이 용이한 다른 변수들로부터 궤도장력을 추정할 수 있는 궤도장력 감지시스템을 개발하였다. 이러한 목적으로 전체 궤도를 아이들러 주위, 스포로킷 주위, 아이들러와 스포로킷 사이 그리고 로드휠 아래와 같이 네 부

분으로 나누고 궤도장력을 고려하여 각 부분을 모델링하였다. 예를 들면, 아이들러 주위의 궤도장력은 아이들러 어셈블리의 기하학적 모델을 이용하여 나타내고 로드휠 아래의 궤도장력은 단순화된 3 자유도 궤도차량 모델을 이용하여 구한 견인력과 관계된다. 견인력은 궤도와 지면사이의 상호작용의 중방향 성분으로 나타내고 확장된 칼만필터(Extended Kalman Filter)를 이용하여 추정한다.

이러한 과정을 통해 험한 주행조건에서도 궤도를 따라서 궤도장력을 감지할 수 있다. 특히 스포로킷과 아이들러 주위에서 최대와 최소 궤도장력이 발생하게 되므로 이들에 대한 감지가 필요하다. 궤도장력 감지시스템의 추정 결과를 다물체 동역학 모델(Multi-Body Dynamics model)⁽⁷⁾과 비교하였다. 다물체 동역학 모델은 고려된 궤도차량을 위해 구성되었으며 1000 자유도 정도의 복잡한 시스템이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 절에서는 궤도장력 감지방식을 제안하였고, 3 절에서는 3 자유도의 궤도차량 모델을 유도하였으며 이를 이용하여 견인력을 추정하기 위한 확장된 칼만필터를 구성하였다. 4 절에서는 아이들러 주위의 궤도장력을 계산하기 위해 아이들러와 아이들러암 모델을 유도하였으며, 5 절에서는 스포로킷 주위의 궤도장력을 계산하는 방법을 제시하였다. 6 절에서는 간략하게 다물체 동역학 모델을 설명하였으며, 마지막으로 7 절에서 추정된 궤도장력과 다물체 동역학 모델에서 계산된 궤도장력을 비교하였다.

2. 궤도장력 감지 시스템

궤도장력은 제동, 조향, 야지 주행등과 같은 다양한 상황에 따라 변하며, 또한 각 궤도의 위치에 따라서도 변한다. 특히 Fig. 1 에서 스포로킷과 아이들러의 앞과 뒤, 첫번째 로드휠의 앞부분과 마지막 로드휠의 뒷부분과 같이 여섯 군데의 각 지점은 최대 궤도장력이 걸릴 수 있으므로 중요하다. 예를 들어 궤도차량이 가속할 때에는 스포로킷의 바로 뒤에서 최대장력 T_{s2} 가 발생하고, 제동시에는 아이들러에서 최대장력 T_{i1} 이 발생한다.

이 여섯 지점에서의 궤도장력은 감지시스템을 단순화하기 위해 다음과 같은 관계로 가정할 수 있다. 첫번째로 궤도장력과 비교하여 아이들러와 첫번째 로드휠사이의 궤도무게를 무시할 수 있으므로 (1% 이하) T_{i2} 와 T_{i1} 는 같다고 가정한다. 같은 가정이 T_{s2} 와 T_{i1} 사이에도 이루어진다. 두번째로 아이들러와 스포로킷사이의 궤도에서는 아이들

러와 스프로킷사이의 궤도무게와 궤도와 롤러사이의 마찰에 의해 장력이 변화하게 되나 그 영향이 아주 작으므로 무시할 수 있다(3% 이하).

$$\begin{aligned} T_{i2} &\approx T_{r2} \\ T_{s2} &\approx T_{r1} \\ T_{r1} &\approx T_{s1} \end{aligned} \quad (1)$$

그리고 아이들러 관성의 영향이 궤도장력에 비해 아주 작으므로 아이들러 주위의 궤도장력이 일정하다고 가정할 수 있다. 이것에 대해서는 4 절에서 자세하게 설명되어질 것이다.

$$T_{s1} \approx T_{r1} \approx T_{i2} \approx T_{r2} \quad (2)$$

견인력 F_r 은 지면과 접촉하는 궤도 양 끝의 궤도장력, 로드휠과 궤도와의 마찰, 그리고 로드휠의 관성력으로 나타낼 수 있다. 그러나 마찰과 관성력의 영향은 견인력에 비해 매우 작으므로 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$F_r \approx T_{r1} - T_{r2} \quad (3)$$

식 (3)과 식 (1)의 두번째 관계식을 이용하면, 스프로킷의 궤도장력 T_{s2} 는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$T_{s2} \approx F_r + T_{r2} \quad (4)$$

위 식은 스프로킷의 구동토크를 나타내기 위해 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Sprocket torque} &\approx r_s \times F_r \\ &= r_s \times (T_{s2} - T_{i2}) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 r_s 는 스프로킷의 반경을 나타낸다. 위의 관계식들은 견인력의 추정과 아이들러 주위의 궤도장력의 계산을 위한 감지 시스템을 단순화시킬 수 있다.

3. 견인력 추정

3.1 궤도차량 모델

궤도차량은 차체와 아이들러, 스프로킷, 로드휠 그리고 그 주변을 회전하는 궤도로 구성되어 있으며 지면과의 상호작용에 의해 매우 복잡한 운동을 하는 시스템이다. 이러한 궤도차량의 운동을 나타내기 위해서는 높은 자유도의 운동방정식이 필요

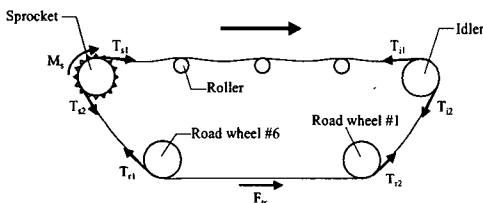


Fig. 1 Track tension around the track path

할 것이다. 그러나 실시간으로 견인력을 추정하기 위해서는 높은 자유도의 모델은 시간의 제약때문에 사용될 수 없다.

이 절에서는 궤도차량의 운동을 단순화하기 위해 직진운동, 횡운동, 요우잉 운동의 3 자유도의 궤도차량을 모델링하였다. 이 모델은 궤도와 지면의 상호작용에 의한 전단응력을 궤도의 접지부분에 따라 적분함으로써 궤도에 작용하는 직진력인 견인력을 계산하는 방식인 Baladi 와 Rohani⁽¹⁾의 3 자유도 모델을 수정하여 구성하였다. 적분에 소요되는 계산시간이 많이 걸린다는 단점을 보완하기 위해 지면과 접촉하는 궤도면을 종방향과 횡방향의 응력 변화를 고려하여 Fig. 2 에서와 같이 10 개의 궤도요소로 나누었다. 궤도요소의 개수는 가능한 실제 차량의 운동을 잘 나타낼 수 있는 최소 개수로 결정하였다. 그러므로 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} M(\dot{v}_x - rv_y) &= \sum_{i=1}^{10} (T_{li} + T_{ri})A \\ &\quad - \sigma \sum_{i=1}^{10} (N_{li} + N_{ri})A \end{aligned} \quad (6)$$

$$M(\dot{v}_y + rv_x) = \sum_{i=1}^{10} (Q_{li} + Q_{ri})A \quad (7)$$

$$\begin{aligned} I_z \dot{r} &= \sum_{i=1}^{10} x_i (Q_{li} + Q_{ri})A + \frac{B}{2} \sum_{i=1}^{10} (T_{ri} - T_{li})A \\ &\quad - \frac{B}{2} \sigma \sum_{i=1}^{10} (N_{ri} - N_{li})A \end{aligned} \quad (8)$$

종방향과 횡방향의 전단응력은 지면 특성, 궤도의 슬립, 수직응력을 이용하여 나타낼 수 있다.⁽⁸⁾

$$\begin{aligned} T_{ji} &= \tau_{ji} \cos \gamma_{ji} \\ &= (C + N_{ji} \tan \phi) \left[1 - \frac{k}{2Ls} (1 - e^{-\frac{2Ls}{k}}) \right] \cos \gamma_{ji} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} Q_{ji} &= \tau_{ji} \sin \gamma_{ji} \\ &= (C + N_{ji} \tan \phi) \left[1 - \frac{k}{2Ls} (1 - e^{-\frac{2Ls}{k}}) \right] \sin \gamma_{ji} \end{aligned} \quad (10)$$

식 (9)와 (10)의 종방향과 횡방향의 전단응력은 주행하는 궤도차량에서 실시간으로 얻기 힘든 변수들이 많기 때문에 직접적으로 계산해내기 힘들다. 그러므로 이 변수들을 아래식과 같이 오른쪽과 왼쪽 궤도 각각에 대해 두 개씩의 변수로 대치하였다.

$$T_{ji} = (\eta_{j1} + N_{ji} \eta_{j2}) \cos \gamma_{ji} \quad (11)$$

$$Q_{ji} = (\eta_{j1} + N_{ji} \eta_{j2}) \sin \gamma_{ji} \quad (12)$$

여기서 η_{j1} 과 η_{j2} 는 궤도와 지면간의 상호작용을 나타내는 변수이다. 수직응력 N_{li} 와 N_{ri1} 는 차량의 무게, 무게중심과 차량 좌표계 중심과의 차, 차량의 관성력에 의한 하중 이동, 궤도장력 등이 있다.

$$N_u = \frac{Mg}{DL} \left[\frac{1}{2} - \frac{H}{MgB} F_{cx} - \frac{6Hx_i}{MgL^2} F_{cx} \right] \quad (13)$$

$$N_n = \frac{Mg}{DL} \left[\frac{1}{2} + \frac{H}{MgB} F_{cx} - \frac{6Hx_i}{MgL^2} F_{cx} \right]$$

여기서 F_{cx} 와 F_{cy} 는 x 와 y 방향의 관성력 성분이고, D 는 궤도의 너비, H 는 차량 무게중심의 높이, g 는 중력가속도, 그리고 x_i 는 i 번째 궤도요소와 차량 무게중심과의 거리를 각각 나타낸다.

식 (11)과 (12)를 식 (6) ~ (8)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 3 자유도의 궤도차량의 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$\dot{v}_x = rv_y + \frac{A}{M} \left[\eta_{11} \sum_{i=1}^{10} \cos \gamma_{1i} + \eta_{12} \sum_{i=1}^{10} N_u \cos \gamma_{1i} + \eta_{r1} \sum_{i=1}^{10} \cos \gamma_{r1} + \eta_{r2} \sum_{i=1}^{10} N_n \cos \gamma_{r1} - \sigma \sum_{i=1}^{10} (N_u + N_n) \right] \quad (14)$$

$$\dot{v}_y = -rv_x + \frac{A}{M} \left[\eta_{11} \sum_{i=1}^{10} \sin \gamma_{1i} + \eta_{12} \sum_{i=1}^{10} N_u \sin \gamma_{1i} + \eta_{r1} \sum_{i=1}^{10} \sin \gamma_{r1} + \eta_{r2} \sum_{i=1}^{10} N_n \sin \gamma_{r1} \right] \quad (15)$$

$$\dot{r} = \frac{A}{I_z} \left[\eta_{11} \sum_{i=1}^{10} \left(x_i \sin \gamma_{1i} - \frac{B}{2} \cos \gamma_{1i} \right) + \eta_{12} \sum_{i=1}^{10} \left(x_i N_u \sin \gamma_{1i} - \frac{B}{2} N_u \cos \gamma_{1i} \right) + \eta_{r1} \sum_{i=1}^{10} \left(x_i \sin \gamma_{r1} + \frac{B}{2} \cos \gamma_{r1} \right) + \eta_{r2} \sum_{i=1}^{10} \left(x_i N_n \sin \gamma_{r1} + \frac{B}{2} N_n \cos \gamma_{r1} \right) + \frac{B}{2} \sigma \sum_{i=1}^{10} (N_u - N_n) \right] \quad (16)$$

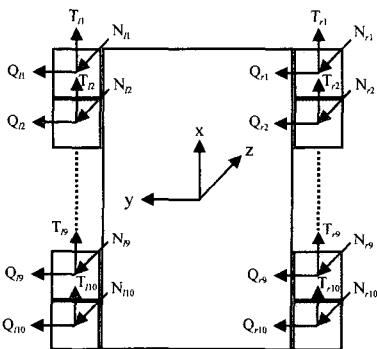


Fig. 2 Force diagram on a tracked vehicle

3.2 확장된 칼만필터를 이용한 견인력 추정

앞에서 유도한 궤도차량의 운동방정식인 식 (14) ~ (16)으로부터 η_{ji} 를 추정하는 틀 구성할 수 있다. 식 (14) ~ (16)에서 η_{ji} 를 상태변수로 대체하고 식을 이산화시키면 다음과 같은 확장된 칼만필터 식을 얻을 수 있다.

$$x_{A,k} = \begin{bmatrix} x_k \\ \eta_j^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(x_{k-1}, u_{k-1}, k-1) \\ \eta_j^{k-1} \end{bmatrix} + w_k \quad (17)$$

$$y_k = h(x_{A,k}, u_k, k) + v_k$$

$$x_{A,k} = [v_x \quad v_y \quad r \quad \eta_{11} \quad \eta_{12} \quad \eta_{r1} \quad \eta_{r2}]^T$$

$$y_k = [v_x \quad a_x \quad v_y \quad a_y \quad r]^T$$

여기서 η_{ji} 는 상수로 가정한다. 상태변수는 직진 속도, 횡속도, 요우잉속도, η_{ji} 를 각각 나타내고, 출력벡터는 직진속도와 직진가속도, 횡속도와 횡가속도, 요우잉속도로 하였다. $w_k \sim N(0, Q_k)$, $v_k \sim N(0, R_k)$ 는 각각 플랜트 섭동과 센서 잡음을 나타낸다. 그리고 확장된 칼만필터 방법⁽⁴⁾이 $\hat{\eta}_{ji}$ 를 추정하기 위하여 적용되었다. 견인력의 추정은 궤도와 지면과의 접촉부분에서의 직진방향 전단응력으로부터 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\hat{F}_{rr} = \sum_{i=1}^{10} A(\hat{\eta}_{r1} + N_n \hat{\eta}_{r2}) \cos \gamma_{r1} \quad (18)$$

$$\hat{F}_{11} = \sum_{i=1}^{10} A(\hat{\eta}_{11} + N_u \hat{\eta}_{12}) \cos \gamma_{1i}$$

4. 아이들러 주위의 궤도장력 추정

아이들러는 궤도차량에서 스프로킷의 반대쪽에 위치하여 궤도를 로드휠이나 스프로킷 방향으로 안내하는 역할을 하며, 또한 궤도장력조절기(track tensioner)와 연결되어 적절한 궤도장력을 유지시켜 주는 역할을 한다. 아이들러, 아이들러암, 장력조절기의 대략적인 형상은 Fig. 3에서와 같다. 그림에서와 같이 차체에 아이들러암을 고정시켜주는 핀(p_1)이 있고 아이들러 중심과 아이들러암이 핀(p_2)으로 연결되어 있다. 장력조절기는 핀(p_1)에 의해 차체에 고정되어 있으며 아이들러암과 연결되어 아이들러의 위치를 조절하게 되고, 이는 곧 아이들러 주위의 장력을 조절하게 되는 것이다. 그러므로 장력조절기의 압력이 아이들러암과 아이들러를 거쳐 궤도에 전달되어 궤도장력의 크기에 영향을 미치게 된다. 이 때 궤도장력에 영향을 미치는 요소로는 장력조절기의 압력과 위치, 아이들러와 아이들러암의 동적 성분, 그리고 궤도가 아이

들러에 접할 때의 접촉각(θ_1, θ_2)이다. 아이들러 주위의 궤도장력을 추정하기 위하여 아이들러와 아이들러암을 모델링 하였으며, 아이들러, 아이들러암과 장력조절기의 기하학적 관계를 구하였다. 그리고 유도된 모델식과 기하학적 관계를 이용하여 궤도장력의 추정식을 유도하였다.

4.1 아이들러 모델

Fig. 4 는 아이들러의 자유물체도(Free Body Diagram)를 나타낸 것이다. T_{i1} 과 T_{i2} 는 궤도장력에 의해 아이들러에 가해지는 힘이고, F_i 는 장력조절기에 의해 가해지는 힘이다. F_{max} 는 아이들러에 접한 궤도의 원심력을 적분하여 구하였다. R_{i1} 는 궤도와 아이들러 사이의 마찰저항이고, R_{p2} 는 핀(p_2)에 걸리는 마찰저항이다. 이 마찰저항 성분들은 다른 힘들에 비해 아주 작으므로 무시한다. 질량이 m_i 이고 관성모멘트가 I_i 인 아이들러의 운동방정식은 다음과 같다.

$$m_i \ddot{x}_i = F_i \sin(\theta_a + \theta_3) - T_{i1} \cos(\theta_a - \theta_1) - T_{i2} \sin(\theta_a + \theta_2) + F_{max} - m_i g \sin \theta_a \quad (19)$$

$$I_i \dot{\omega}_i = r_i (T_{i1} - T_{i2}) \quad (20)$$

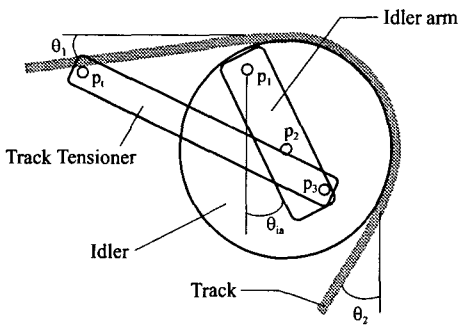


Fig. 3 Geometry of the idler and the track tensioner

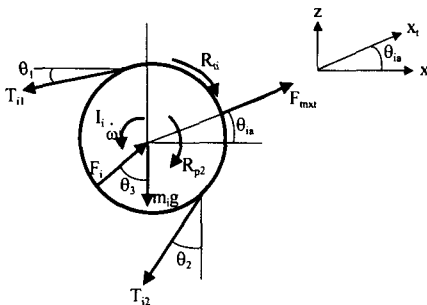


Fig. 4 Free body diagram of the idler

4.2 아이들러암 모델

Fig. 5 는 아이들러암의 자유물체도이고, 여기서 F_i 와 F_r 은 각각 아이들러로부터의 반력과 장력조절기의 액추에이터 힘을 나타낸다. 각 편에는 마찰저항 R_{p1}, R_{p2}, R_{p3} 가 작용하나 그 크기가 작으므로 무시한다.

$$I_{ia} \dot{\omega}_a = F_i l_1 \sin(\theta_{ia} + \theta_3) - F_r l_3 \cos(\theta_r + \theta_{ia} + \theta_e) + m_{ia} g l_G \sin \theta_{ia} \quad (21)$$

4.3 기하학적 관계

아이들러와 아이들러암 모델의 식들에서 장력조절기의 위치와 같은 측정 가능한 변수들로부터 기하학적 관계를 이용하면 다른 변수들을 계산해 낼 수 있다.

4.3.1 장력조절기의 위치 l_r 의 변화에 따른 아이들러암 각 θ_{ia} 의 변화

장력조절기의 위치에 따라 아이들러암의 위치가 결정된다. Fig. 6 에서와 같이 핀 t 와 핀 1 은 차체에 대해 같은 높이에 있으므로 cosine 제 2 법칙을 이용하면, 장력조절기의 길이 l_r 과 아이들러암의 각 θ_{ia} 의 관계는 다음과 같다.

$$\theta_{ia} = \sin^{-1} \left(\frac{l_r^2 - l_p^2 - l_3^2}{2l_p l_3} \right) - \theta_e \quad (22)$$

여기서 l_r 을 제외한 다른 변수들은 상수이다.

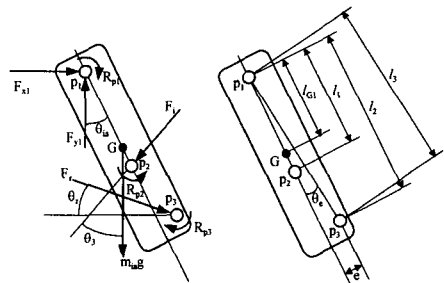


Fig. 5 Free body diagram and geometry of the idler arm

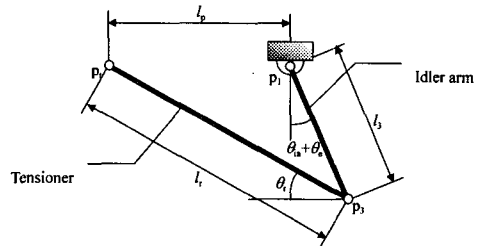


Fig. 6 Geometric relation between the idler arm and the tensioner

4.3.2 l_r 의 변화에 따른 접촉각 θ_1 의 변화

궤도의 접촉각 θ_1 은 Fig. 7 에서와 같이 아이들러암의 위치에 의해 결정되는데, 아이들러암의 증분 $\Delta\theta_{ia}$ 에 따라 변하는 접촉각을 고려하면 다음과 같다. 궤도장력이 충분히 커서 롤러와 아이들러 사이의 궤도의 처짐이 없다고 가정하였다.

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{l_1(\cos\theta_{ia} - \cos\theta_{ia})}{l_{ra} + l_1(\sin\theta_{ia} - \sin\theta_{ia})} \right) \quad (23)$$

4.3.3 l_r 의 변화에 따른 접촉각 θ_2 의 변화

궤도의 접촉각 θ_2 는 Fig. 8 에서와 같이 아이들러암의 위치와 첫번째 로드암의 위치에 의해 결정된다. 궤도장력이 충분히 커서 아이들러와 로드휠 사이의 궤도의 처짐이 없다고 가정하였다. 아이들러와 로드휠은 반지름이 거의 같으므로 아이들러 중심과 로드휠 중심을 잇는 직선이 궤도와 평행하다고 근사하여 접촉각 θ_2 를 계산한다.

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{l_{ra} + l_1 \sin\theta_{ia} + l_{ra} \cos\theta_{ra}}{l_{ray} - l_1 \cos\theta_{ia} + l_{ra} \sin\theta_{ra}} \right) \quad (24)$$

4.4 아이들러 주위의 궤도장력 계산

식 (19)와 (20)을 이용하면 궤도장력 T_{i1} 과 T_{i2} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

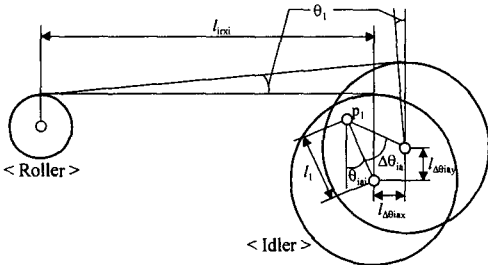


Fig. 7 Geometric relation between θ_{ia} and θ_1

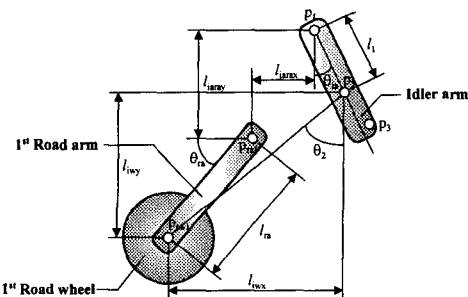


Fig. 8 Geometric relation between θ_{ia} , θ_{ra} and θ_2

$$T_{i1} = \frac{1}{\cos(\theta_a - \theta_1) + \sin(\theta_a + \theta_2)} [F_i \sin(\theta_a + \theta_3) + F_{max} - m_i g \sin\theta_a + \frac{I_i \dot{\omega}_i}{r_i} \sin(\theta_a + \theta_2) - m_i \ddot{x}_i] \quad (25)$$

$$T_{i2} = \frac{1}{\cos(\theta_a - \theta_1) + \sin(\theta_a + \theta_2)} [F_i \sin(\theta_a + \theta_3) + F_{max} - m_i g \sin\theta_a - \frac{I_i \dot{\omega}_i}{r_i} \cos(\theta_a - \theta_1) - m_i \ddot{x}_i] \quad (26)$$

여기서 F_i 는 장력조절기에 의해 아이들러암을 거쳐 아이들러에 가해지는 힘으로서 아이들러암의 운동방정식으로부터 구할 수 있다. 식 (21)을 F_i 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$F_i = \frac{1}{l_1 \sin(\theta_a + \theta_3)} [F_r l_3 \cos(\theta_r + \theta_a + \theta_e) - m_a g l_G \sin\theta_a + I_{a1} \dot{\omega}_a] \quad (27)$$

위 식을 식 (25)와 (26)에 대입하면 궤도장력 추정식을 구할 수 있다.

$$\hat{T}_{i1} = \frac{1}{\cos(\theta_a - \theta_1) + \sin(\theta_a + \theta_2)} \times \left[\frac{F_r l_3 \cos(\theta_r + \theta_a + \theta_e) - m_a g l_G \sin\theta_a + I_{a1} \dot{\omega}_a}{l_1} + F_{max} - m_i g \sin\theta_a + \frac{I_i \dot{\omega}_i}{r_i} \sin(\theta_a + \theta_2) - m_i \ddot{x}_i \right] \quad (28)$$

$$\hat{T}_{i2} = \frac{1}{\cos(\theta_a - \theta_1) + \sin(\theta_a + \theta_2)} \times \left[\frac{F_r l_3 \cos(\theta_r + \theta_a + \theta_e) - m_a g l_G \sin\theta_a + I_{a1} \dot{\omega}_a}{l_1} + F_{max} - m_i g \sin\theta_a - \frac{I_i \dot{\omega}_i}{r_i} \cos(\theta_a - \theta_1) - m_i \ddot{x}_i \right] \quad (29)$$

아이들러 주위의 궤도장력을 추정하기 위해서는 장력조절기의 힘, 장력조절기의 위치, 첫번째 로드암의 위치, 아이들러의 회전속도, 그리고 궤도차량 중심에서 속도와 가속도의 측정이 필요하다. 궤도장력조절기는 주로 유압시스템으로 이루어지므로 아이들러의 가속도 \ddot{x}_i 는 매우 작다. 또한 궤도차량의 일반적인 주행시에는 관성에 의한 성분들이 다른 성분들에 비해 무시할 정도로 작게 된다. 그러므로 식 (28)과 (29)는 아래와 같이 가정할 수 있고, 이 때에는 궤도장력 T_{i1} , T_{i2} 는 같게 된다.

$$\hat{T}_{i1} \approx \hat{T}_{i2} \approx \frac{1}{\cos(\theta_a - \theta_1) + \sin(\theta_a + \theta_2)} \times \left[\frac{F_r l_3 \cos(\theta_r + \theta_a + \theta_e) - m_a g l_G \sin\theta_a + F_{max} - m_i g \sin\theta_a}{l_1} \right] \quad (30)$$

여기서 θ_{ia} , θ_1 과 θ_2 는 각각 식 (22), (23)과 (24)로부터 계산된다.

5. 스프로킷 주위의 궤도장력 추정

스프로킷은 엔진, 토크 컨버터, 트랜스미션, 기어박스, 구동축 등에 의해 구동된다. 만일 스프로킷 구동토크를 알 수 있다면 스프로킷 주위의 궤도장력은 직접 구해질 수 있다. 그러나 여러가지 주행조건에 따라 변하는 엔진 출력토크와 출력비를 실시간으로 얻기가 힘들다. 이에 본 연구에서는 앞에서 추정된 아이들러 주위의 궤도장력과 확장된 칼만필터로 추정한 견인력을 이용하여 스프로킷 주위의 궤도장력을 추정하는 방법을 제안하였다. 스프로킷 주위의 궤도장력은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{T}_{s1} &= \hat{T}_{i1} \\ \hat{T}_{s2} &= \hat{T}_{i2} + \hat{F}_r \end{aligned} \quad (31)$$

여기서 \hat{T}_{i1} 과 \hat{T}_{i2} 는 식 (30)에서 계산되고, \hat{F}_r 은 식 (18)로부터 구해진다.

6. 궤도차량의 다물체 동역학 모델

궤도차량의 실제 궤도장력 신호를 얻기위하여 다물체 동역학(Multi-Body Dynamics) 모델을 사용하였다. 다물체 동역학 모델의 자세한 내용은 본 논문의 범위를 벗어나므로 여기서는 간단히 설명하겠다. 다물체 동역학 모델을 이용한 궤도차량의 동적 해석의 자세한 내용은 Ryu 등⁽⁷⁾에 나와 있다. 이 모델에서 각각의 궤도링크는 6 자유도의 강체로 이루어져 있고, 각각의 궤도링크는 실험에서 측정된 컴플라이언트 힘 요소에 의해 연결되어 있다. 전체 차량모델은 189 개의 강체와 36 개의 레볼류트 조인트 그리고 152 개의 부상 요소로 구성된 954 자유도의 시스템이다. 이러한 운동방정식을 풀기위해 회귀적 방법과 명시적 수치 적분 방식을 사용하였다.

7. 시뮬레이션 결과

본 연구에서 제안된 궤도장력 감지방법을 이용하여 추정한 궤도장력을 6 절에서 설명한 다물체 동역학 모델의 결과와 비교하였다. 시뮬레이션은 단단하고 평탄한 지면에서 다양한 상황에 대해 수행되었으며, 그 결과들은 아래와 같다.

천천히 가속하는 경우

좌우 스프로킷을 10 초동안 정지상태에서 11.2km/h 의 속도가 될 때까지 가속하였으며, 아이들러와 스프로킷에서의 궤도장력을 추정한 결과는 각각 Fig. 9 와 Fig. 10 과 같다. 아이들러와 스프로킷 두부분 모두 추정된 궤도장력이 실제값을 잘 따라감을 알 수 있다.

급격히 가속하는 경우

궤도차량이 5 초동안 정지상태에서 30km/h 의 속도가 될 때까지 가속하였으며, 아이들러와 스프로킷에서의 궤도장력을 추정한 결과는 Fig. 11 과 Fig.12 에 각각 도시되어 있다. 추정된 궤도장력이 실제값과 잘 일치하지만 속도가 증가할수록 비선형성이 커져서 궤도장력 감지시스템에서의 추정 오차뿐만 아니라 다물체 동역학 모델의 시뮬레이션 오차도 발생한다.

등속으로 주행하는 경우

궤도차량이 11.2km/h 의 등속도로 주행하며, 아이들러와 스프로킷에서의 궤도장력을 추정한 결과는 Fig. 13 과 Fig. 14 와 같다. 궤도, 아이들러, 스프로킷, 로드휠 등과 같은 요소사이에서 잦은 접촉으로 인해 추정된 값뿐만아니라 실제값에서도 많은 피크(peak)가 발생한다.

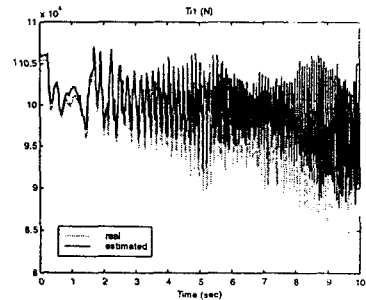


Fig. 9 Track tension estimation during slow acceleration (T_{i1})

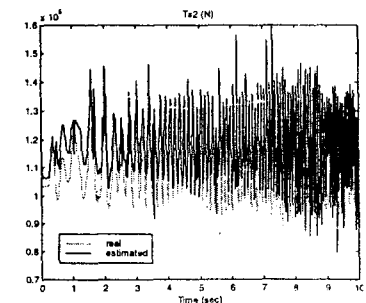


Fig. 10 Track tension estimation during slow acceleration (T_{s2})

8. 결론

스프로킷과 아이들러 주위의 궤도장력을 추정하기 위해 아이들러와 아이들러암 모델식, 아이들러 주변의 기하학적 관계를 유도하였고 3 자유도 궤도차량 모델로부터 확장된 칼만필터(Extended Kalman Filter)를 구성하여 견인력을 추정하였다. 유도된 모델식과 추정된 견인력을 이용하여 직진주행시의 궤도장력 감지 시스템(monitoring system)을 구성하였다. 실제 궤도차량의 운동을 나타내기 위해 다물체 동역학 모델(Multi-Body Dynamics Model)을 사용하였다. 제안된 궤도장력 감지 방식의 결과를 다물체 동역학 모델의 결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였다. 추정 결과에서와 같이 궤도장력조절기의 위치와 압력, 스프로킷 각속도, 로드암 각, 차량의 속도와 가속도등과 같은 측정 가능한 변수로부터 실시간 궤도장력을 추정하는 감지시스템을 구성할 수 있음을 알 수 있다. 추정된 궤도장력을 이용하여 장력조절기의 압력이나 위치 등의 세트포인트(setpoint)를 결정함으로써 적정궤도장력을 유지할 수 있고, 이에 따라 궤도차량의 기동성이나 내구성의 향상을 가져올 수 있을 것이다.

참고문헌

- (1) Baladi, G.Y. and Rohani, B., 1979, "A Terrain-Vehicle Interaction Model for Analysis of Steering Performance of Track-Laying Vehicles," *Technical Report GL-79-6*, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station.
- (2) Garnich, M.R. and Grimm, T.R., 1984, "Modeling and Simulation of a Tracked Vehicle," *International Computers in Engineering Conference*, Vol.2, pp.591~600.
- (3) Grewal, M.S. and Andrews, A.P., 1993, *Kalman Filtering Theory and Practice*, Chapter 5, Prentice Hall.
- (4) Kar, M.K., 1987, "Prediction of Track Forces in Skid-steering of Military Tracked Vehicles," *Journal of Terramechanics*, Vol. 24, No. 1, pp. 75~86.
- (5) Oakley, R., Quinn, D. and Jones, R.D., 1994, "Track Tensioning Programme for for Tacom on the Active Suspension Scorpion (P3) Tank," *NTIS Report #ADA282723*
- (6) Ryu, H.S., Bae, D.S., Choi, J.H. and Shabana, A., 1998, "A Compliant Tank Link Model for High-Speed, High-Mobility Tracked Vehicle," *International Journal for Numerical Methods in Engineering* (in review).
- (7) Wong, J.Y., 1993, *Theory of Ground Vehicles*, 2nd ed., John Wiley & Sons.

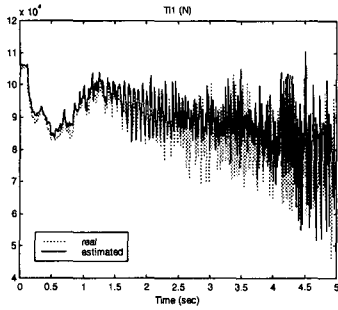


Fig. 11 Track tension estimation during steep acceleration (T_{12})

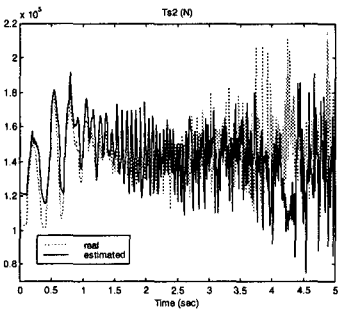


Fig. 12 Track tension estimation during steep acceleration (T_{s2})

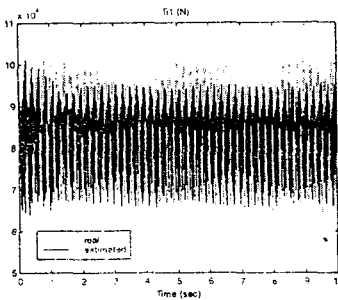


Fig. 13 Track tension estimation during constant velocity (T_{11})

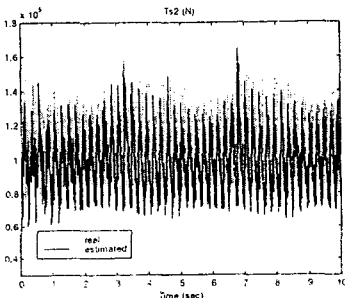


Fig. 14 Track tension estimation during constant velocity (T_{s1})