

궤도차량의 동적 궤도장력 조절시스템 개발

서문석* · 허건수† · 홍대건** · 이춘호** · 최필환**
(2001년 3월 31일 접수, 2001년 7월 25일 심사완료)

Development of a Dynamic Track Tensioning System in Tracked Vehicles

Mun-suk Suh, Kunsoo Huh, Daegun Hong, Choonho Lee and Philwhan Choi

Key Words : Tracked Vehicle(궤도차량), Tension Monitoring(장력감지), Tension Control(장력제어), Dynamic Track Tensioning System (동적 궤도장력 조절시스템)

Abstract

The mobility of tracked vehicles is mainly influenced by the interaction between tracks and soil, so that the characteristics of their interactions are quite important for the tracked vehicle study. In particular, 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 peal-off of tracks from the road-wheels, the Dynamic Track Tensioning System (DTTS) which maintains the optimum track tension throughout the maneuver is required. It consists of track tension monitoring system, track tension controller and hydraulic system. In this paper, a dynamic track tensioning system is developed for tracked vehicles which are subject to various maneuvering tasks. The track tension is estimated based on the idler assembly model. Using the monitored track tension and considering the highly nonlinear hydraulic units, fuzzy logic controllers are designed in order to control the track tension. The track tensioning performance of the proposed DTTS is verified through the simulation of the Multi-body Dynamics tool.

1. 서론

궤도차량은 스프로킷, 아이들러 그리고 로드휠을 감싸고 있는 궤도에 의해 움직이는 차량을 뜻한다. 궤도차량의 거동에 가장 큰 영향을 주는 인자로는 궤도의 특성을 들 수 있다. 궤도차량에서는 기동성을 향상시키기 위해서 로드휠 행정을 크게 하고 엔진 출력을 증가시키는데, 이로 인해 궤도의 처짐이 빈번히 발생하고 심할 경우 스프로킷으로부터 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. 따라서 궤도의 이탈이나 파손을 방지하고 안정한 주행을 하기 위해서는 적절한 궤도장력을 유지하는 것이 필요하다.

일반적으로 기존의 궤도차량에서는 아이들러에 연결된 수동형 유압 궤도장력조절기에 의해 궤도장력이 조절되는데, 여기에는 보통 차량 무게의 10% 정도의 초기장력이 주어지며 포장도로, 야지, 피보팅(pivoting)과 같은 모드를 가지게 된다. 예를 들면 포장도로에서는 마찰에 의한 동력 손실을 최소화하기 위해 궤도장력을 최소로 하고, 야지에서는 궤도장력을 증가시켜 궤도와 지면사이의 견인력을 높여 준다.⁽¹⁾ 궤도차량의 운전자는 경험에 근거하여 각 상황에 적당한 모드를 결정하게 된다. 그러나 이러한 운전자에 의한 수동적인 모드 결정이 궤도의 이탈이나 파손과 같은 중대한 문제를 야기시킬 수도 있다. 그러므로 위와 같은 한계를 극복하기 위해서 능동형 궤도장력조절기 개발이 이루어지고 있다.

기존의 연구에서 장력조절기에 대한 두 가지 방법을 찾을 수 있었다. 첫번째 방법은 아이들러와 근접한 로드휠을 기계적 장치를 이용하여 연결하여 구성하였다.⁽²⁾ 이는 궤도장력을 고려하지 않고 아이들러의 위치가 로드휠의 위치에 의해서만

* 국방과학 연구소

† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부
E-mail : khuh2@hanyang.ac.kr
TEL : (02)2290-0437 FAX : (02)2295-4585

** 현대모비스

결정되어진다. 두번째 방법은 계산된 궤도길이 (Track Path Length)에 근거하여 Oakely et al.⁽³⁾에 의해 개발되었으며, 계산된 궤도길기와 적정궤도길이를 비교하여 유압 액추에이터를 이용하여 아이들러의 위치를 제어한다. 그러나 위의 두 방법은 궤도장력 제어를 위해 궤도장력에 대한 정보를 사용하지 않으며 따라서 간접 능동형 장력조절기로 분류되어져야 한다.

본 논문에서는 실제로 궤도차량에서 주행중에 발생하는 궤도장력을 온라인 실시간으로 추정하고 이를 이용하여 직접적으로 궤도장력을 유압 제어하는 궤도장력 제어시스템을 제안한다. 이를 위하여 아이들러 어셈블리의 모델을 이용하여 궤도장력을 추정하였고, 궤도장력 제어를 위하여 사용되어지는 유압장치를 모델링하였다. 그리고 궤도장력 제어를 위한 퍼지논리 제어기를 설계하였으며 궤도장력 추정 알고리즘, 유압장치 모델 그리고 퍼지논리 제어기를 궤도차량의 다물체 동역학 시뮬레이션 툴에 적용하여 시뮬레이션 하였으며 그 성능을 검증하였다.

궤도장력 제어시스템의 성능검증을 위하여 사용된 다물체 동역학 시뮬레이션 툴⁽⁶⁾은 본 논문에서 대상으로 삼은 궤도차량을 위해 구성되었으며 약 1000 자유도 정도의 복잡한 시스템이다. 전체 차량모델은 189 개의 강체와 36 개의 레볼류트 조인트 그리고 152 개의 부싱 요소로 구성된 다물체 동역학 시스템으로 구성되어 있다. 이러한 운동방정식을 풀기위해 회귀적 방법과 명시적 수치 적분 방식을 사용한다. 이 시뮬레이션 툴의 자세한 내용은 본 논문의 범위를 벗어나므로 생략한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 장에서는 궤도장력 제어를 위해 필요한 변수인 궤도장력을 추정하였고, 3 장에서는 궤도장력 제어를 담당하는 유압장치를 설명하였고, 4 장에서는 퍼지논리를 이용한 궤도장력 제어기를 설계하였으며, 5 장에서 다물체 동역학 시뮬레이션을 통하여 개발된 동적 궤도장력 조절시스템의 성능을 검증하였다. 그리고 마지막 6 장에서 결론을 맺었다.

2. 궤도장력의 추정

궤도장력을 직접적으로 제어하기 위해서는 궤도차량의 주행 중에 궤도장력에 대한 정보가 온라인 실시간으로 감지가 가능하여야 한다. 그러나 궤도장력은 센서와 같은 물리적 장치를 사용하여 쉽게 측정되어질 수 없으므로 궤도차량의 동적 거동 데이터만을 사용하여 추정되어야 한다.

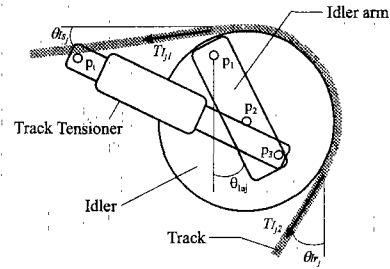


Fig. 1 Geometry of the idler and the track tensioner

궤도장력의 제어는 아이들러에 부착된 능동형 궤도장력 조절기로부터 수행되므로 아이들러 주위의 궤도장력을 제어할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 궤도의 여러 부분 중 아이들러 주위의 궤도장력을 추정하는 방법만을 설명한다. 아이들러는 궤도장력 조절기를 지지하고 있으며 궤도장력을 유지하기 위하여 스프링과 로드휠로부터 궤도를 유도한다. 아이들러와 아이들러암 그리고 궤도장력조절기의 기하학적 형상은 Fig. 1 에 나타난 것과 같다.

궤도장력에 영향을 미치는 요소로는 장력조절기의 압력과 위치, 아이들러와 아이들러암의 동적 성분, 그리고 궤도가 아이들러에 접할 때의 접촉각이다. 그리고 아이들러 관성의 영향은 궤도장력에 비해 아주 작으므로 아이들러 주위의 궤도장력은 일정하다고 가정할 수 있다. 아이들러와 아이들러암의 동적모델, 아이들러, 아이들러암과 장력조절기의 기하학적 관계를 토대로 아이들러 주위의 궤도장력은 식 (1)과 같이 계산되어질 수 있다. 식 (1)의 상세 유도는 허건수 등(2000)⁽⁴⁾에서 주어졌다.

$$\begin{aligned} \hat{T}_{11} &\approx \hat{T}_{12} \\ &= \frac{F_{T12} \cos(\theta_j + \theta_{a_j} + \alpha_j) - m_i g l_j \sin \theta_{a_j} + F_{c_j} - m_i g \sin \theta_{a_j}}{l_1 \cos(\theta_{a_j} - \alpha_j) + \sin(\theta_{a_j} + \theta_j)} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 θ_{1s_j} 는 아이들러 위쪽에서 궤도의 접촉각이며 θ_{1r_j} 는 아이들러 아래쪽에서 궤도의 접촉각이다. θ_{1a} 는 아이들러 암 각도이며 θ_j 는 궤도장력 조절기의 각도이다. l_1 은 핀 1(p1)과 핀 2(p2) 사이의 거리이고, l_3 는 핀 1(p1)과 핀 3(p3)사이의 거리이며 l_6 는 핀 1(p1)과 아이들러 암의 무게중심까지의 거리이다. m_i 는 아이들러의 질량이며 m_{ia} 는 아이들러암의 질량이다. F_{Tj} 와 F_{c_j} 는 궤도장력 조절기에서의 액추에이터 힘과 아이들러 주위를 감싸는 궤도의 원심력을 나타낸다.

θ_{1a_j} , θ_{1s_j} 와 θ_{1r_j} 는 아이들러 어셈블리의 기하학

적 관계로부터 계산되어질 수 있고 첨자 j 는 각각 레도의 오른쪽과 왼쪽을 표시한다. 레도장력 조절기의 관성항과 아이들러의 관성항은 레도장력의 변화에 미치는 영향이 일반적인 레도장력의 크기에 비해 매우 작기 때문에 무시할 수 있다. 위 장력 추정식은 레도차량의 어떠한 주행조건에서도 사용되어질 수 있다. 왜냐하면 위 식이 노면의 형상이나 레도차량의 운동저항 등에 대하여 어떠한 가정도 없이 유도되었기 때문이다. 아이들러 주위의 레도장력은 레도장력 조절기의 압력과 길이 그리고 로드암 #1의 각도의 측정에 의하여 계산되어진다.

3. 유압장치

동적 레도장력 조절기에서 유압장치는 레도장력 조절용 유압실린더에 필요한 유압동력을 제공하며, 서보 밸브를 이용해 장력조절 실린더에 유입되는 유량을 조절하여 실린더의 길이를 제어하는 장치이다. 이 유압장치는 압력보상형 유압펌프, 전기모터, 축압기, 3단 서보 밸브, 솔레노이드 밸브, 릴리프 밸브, 감압밸브, 저유기, 냉각장치 등의 구성품으로 이루어지며, 시스템의 압력은 실린더가 최대작동길이인 0.25m에 도달했을 때 레도의 가능한 최대부하 하중조건을 약 23톤으로 가정하고 유압 서보밸브와 관로 손실 등을 고려하여 320kgf/cm²으로 설정되어 있다. Fig. 2는 본 논문에서 사용된 유압장치의 개략도를 나타낸다.

유압장치에 사용된 주유압 펌프는 압력보상형 펌프를 사용하며 유압장치의 설정압력이 320kgf/cm²에 도달하면 내부 사판을 제로유량 상태로 보내 불필요한 에너지가 릴리프 밸브를 통하여 열로 소모되는 것을 방지하였고, 레도장력 조절 실린더가 정상 작동위치에서 최대 작동위치까지 0.5 초 내에 이동 가능하도록 축압기를 사용하여 순시동력이 증가되도록 설계되어 있다.

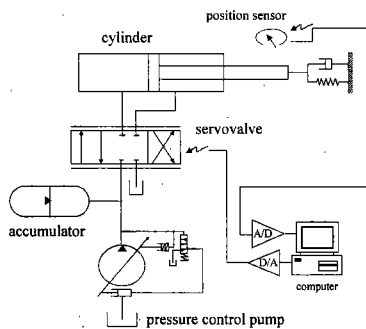


Fig. 2 Hydraulic system

또 서보밸브의 개구면적비가 편로드 실린더의 수압면적비와 동일한 4 웨이 밸브를 채택하였다. 이 유압장치는 레도장력 조절시 조절실린더의 팽창시만 유압동력을 이용하고 수축시에는 레도장력을 이용하는 방식과 팽창, 수축시 모두 유압동력을 사용하는 2 가지 방식으로 작동할 수 있도록 설계되어 있는데 본 논문에서는 후자의 방식을 택하여 사용하였다. 이러한 유압장치는 파워팩 모델, 서보밸브 모델 그리고 실린더 모델은 비선형 운동방정식으로 모델링 되며 그 모델식은 아래와 같다

Power Pack Model

$$\dot{P}_{pump} = \frac{\beta}{V_{pump}}(Q_{th} - Q_{leak} - Q_{load} - Q_{accum}) \quad (2)$$

$$Q_{th} = \frac{63}{6.0e7} \cdot \omega_{motor} \cdot \phi \cdot I_{yoke} \quad (3)$$

$$\phi = -30\theta + 30$$

$$I_{yoke} = \begin{cases} \phi_{min} = 0 & \text{if } P_{pump} \geq 320e5 \\ \phi_{max} = 1 & \text{if } P_{pump} < 320e5 \end{cases}$$

$$Q_{leak} = 2.5e-12 \cdot P_{pump} \quad (4)$$

$$\text{if } P_{gas} > P_{pre} \text{ or } P_{pump} > P_{gas}$$

$$Q_{accum} = K_{accum} \sqrt{\frac{2}{\rho} |P_{pump} - P_{gas}|} \cdot \text{sign}(P_{pump} - P_{gas}) \quad (5)$$

$$\text{otherwise}$$

$$Q_{accum} = 0$$

$$P_{gas} = (P_{pre} + 1.0e5) \left[\frac{V_{pre}}{V_{pre} - \int Q_{accum} dt} \right] - 1.0e5$$

여기서 P_{pump} 는 펌프의 압력, P_{gas} 는 가스압력, V_{pump} 는 펌프의 체적이며, Q_{th} 는 이론적 유량, Q_{leak} 는 유출 유량, Q_{load} 는 로드 유량, Q_{accum} 는 축압기 유량이고, ω_{motor} 는 모터 속도를 나타낸다.

Servo Valve Model

$$\text{if } u_n \geq 0$$

$$Q_{load} = K_q \cdot u_n \cdot \frac{1+n}{2\sqrt{1+4n^3}} \sqrt{P_{pump} - \text{sign}(u_n) \cdot P_L} \quad (6)$$

$$\text{if } |P_L| > P_{pump}, P_L = \text{sign}(P_L) \cdot P_{pump}$$

$$\text{if } u_n < 0$$

$$Q_{load} = K_q \cdot u_n \cdot \frac{1+n}{2\sqrt{1+4n^3}} \sqrt{n \cdot P_{pump} - \text{sign}(u_n) \cdot P_L}$$

$$\text{if } |P_L| > n \cdot P_{pump}, P_L = \text{sign}(P_L) \cdot n \cdot P_{pump}$$

여기서 u_n 은 서보밸브의 제어 입력이며, K_g 는 유량계인을 나타내고, n 은 실린더의 면적비이다. 그리고 P_L 은 로드의 압력을 나타낸다.

Cylinder Model

$$\dot{P}_L = (Q_{load} - A_e \cdot \dot{X}) \frac{2\beta \cdot (1 + 4n^3)}{A_b \cdot X + 4n^3 \cdot A_b \cdot (L_{cyl} - X)} \quad (7)$$

여기서 A_b 는 실린더 보어의 면적이며, A_e 는 실린더 보어면적과 로드면적의 평균값을 나타낸다. 그리고 L_{cyl} 은 실린더의 행정이며, X 는 실린더, 즉 장력조절기의 길이이다.

4. 퍼지논리 제어기 설계

궤도차량의 주행시에 궤도장력은 주행조건이나 노면조건 등에 따라서 매우 비선형적으로 변하고 또 궤도장력조절을 담당하는 유압장치도 강한 비선형성을 띠고 있다. 이러한 비선형 시스템을 제어하기 위하여 여러 제어기를 시도하였으며 이 중에서 가장 좋은 성능을 보여주는 퍼지논리 제어기를 사용하였다. 본 논문에서의 퍼지논리 제어기는 퍼지화(fuzzification), 퍼지추론(fuzzy inference), 퍼지제어규칙(fuzzy rule base) 그리고 비퍼지화(defuzzification)로 구성되어 있다.

Fig. 3 은 궤도장력을 추정하고 추정된 정보를 이용하여 궤도장력을 제어하는 궤도장력 제어시스템의 블록 다이어그램을 나타낸 것이다. 장력조절기에서 작용하는 힘과 장력조절기의 길이 등을 측정하여 모니터링 시스템에서 아이들러 주위의 궤도장력을 추정하고, 추정된 궤도장력을 토대로 퍼지논리 제어기로 구성된 장력제어기에서 제어 입력인 궤도장력 조절기의 길이가 주어지면 유압장치를 통해 장력조절기의 힘을 작용하여 궤도장력 조절기의 길이를 제어하게 된다. 유압장치에서의 길이제어는 비례 제어기를 사용하며 최대 약 0.5 초의 시간지연(time delay)을 가지고 있다.

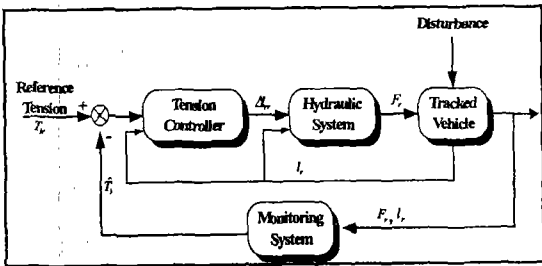


Fig. 3 Block diagram of the DTTS

퍼지논리 제어기에서 입력과 출력인 eT , deT/dt 그리고 Δl_r 은 각각 기준 궤도장력과 현재 궤도장력의 오차, 오차의 변화율 그리고 장력조절기의 길이를 나타내며, 각각 모두 5 개의 언어변수를 가진 삼각형의 소속함수(triangular membership function)로 나타내고 정규화 한 후 스케일 계수를 적용하여 사용하였다. Fig. 4 는 사용된 소속함수이며, 입력과 출력의 상호 관계는 Table 1 과 같은 퍼지제어규칙으로 구성하였다. 퍼지추론은 Mamdani 의 추론 방식⁽⁷⁾을 사용하였으며, 비퍼지화는 통상적으로 사용되는 무게중심법을 사용하였다.

5. 시뮬레이션

앞 장에서 설계된 제어시스템을 다양한 주행조건과 노면조건에 대하여 성능을 검증하기 위하여 궤도장력 추정 알고리즘, 유압장치 모델 그리고 퍼지논리 제어기를 궤도차량의 다물체 동역학 시뮬레이션 틀⁽⁸⁾에 적용하여 다양한 조건으로 시뮬레이션 하였다.

5.1 직진 주행

다양한 노면과 속도입력에 따른 궤도장력의 제어성능을 검증하기 위하여 Table 2 에 있는 4 가지의 경우에 대하여 시뮬레이션 하였다.

(a) 가속후 등속 주행

평면 노면에서 10 초동안 정지상태에서 22.4 km/h 의 속도가 될 때까지 가속후 10 초동안 등속 주行的 속도입력을 주었다.

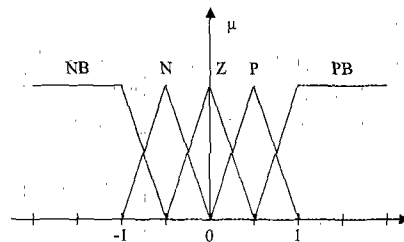


Fig. 4 Membership function for the FLC

Table 1 The rule base of the FLC

deT/dt \ eT	NB	N	Z	P	PB
NB	PB	PB	PB	P	Z
N	PB	PB	P	Z	N
Z	PB	P	Z	N	NB
P	P	Z	N	NB	NB
PB	Z	N	NB	NB	NB

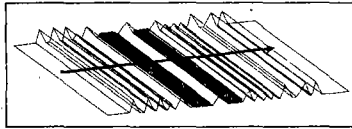


Fig. 5 Rough road profile (Profile IV)

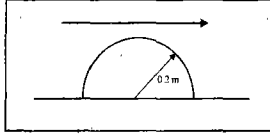


Fig. 6 Symmetric single bump used in simulation

Table 2 Reference track tension around the idler

주행 조건	기준 장력
(a) 가속후 등속 주행	4 ton
(b) 급감속 주행	4 ton
(c) 험지 주행(Profile IV)	5 ton
(d) 범프 통과	5 ton

(b) 급감속 주행

평면 노면에서 초기속도 36.0 km/h 에서 8 초동안 속도가 0 으로 될 때까지 급감속후 2 초동안 정지의 속도입력을 주었다.

(c) 험지(PROFILE IV)

Profile IV 는 아래 Fig. 5 와 같이 다양한 크기의 삼각형과 사각형의 요철로 구성되어 있는 노면이며 삼각형 요철의 최고높이는 약 0.3m 그리고 사각형 요철의 높이는 약 0.075m 정도이다. 그리고 속도입력은 10 초동안 정지상태에서 22.4km/h 의 속도가 될 때까지 가속후 10 초동안 등속 주행의 입력을 사용하였다

(d) 범프

범프통과 시뮬레이션에는 Fig. 6 과 같은 0.2m 의 반지름을 가지고 좌우 궤도에 같은 노면입력이 되는 대칭범프를 사용하였으며 22.4km/h 로 등속주행 하였다.

각 시뮬레이션에서 아이들러 주위의 궤도장력의 기준값은 아래 Table 2 와 같이 일정한 장력을 주어 시뮬레이션 하였으며 결과는 Fig. 7 ~ Fig. 10 에 나타내었다. 결과를 살펴보면 제어 대상인 아이들러 주위의 궤도장력은 원하는 기준장력을 잘 유지함을 볼 수 있었고, 노면의 변화가 심한 경우 즉 험지 주행이나 범프통과의 경우 수동형 장력조절기의 경우 궤도장력의 변화가 매우 심하였으나 본 논문에서 구성한 능동형 궤도장력 조절기의 경우 궤도장력의 변화정도가 매우 적어지며 기준 장력을 잘 추종하였다.

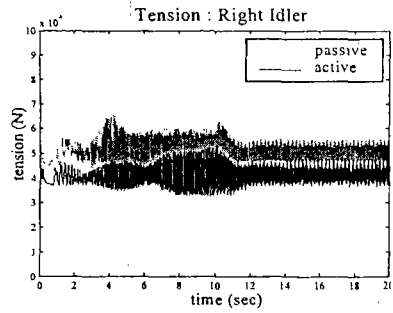


Fig. 7 Tension control in test (a)

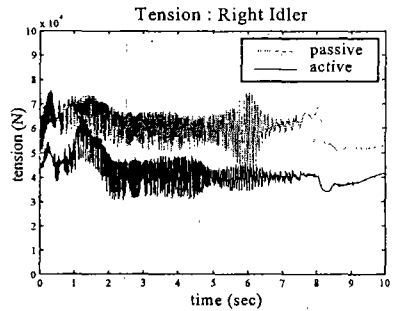


Fig. 8 Tension control in test (b)

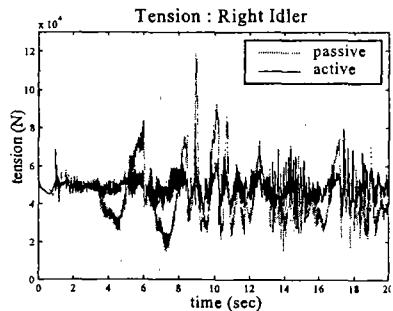


Fig. 9 Tension control in test (c)

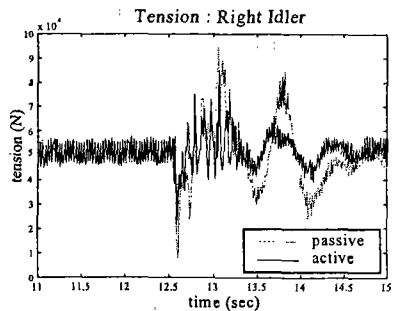


Fig. 10 Tension control in test (d)

13 은 test (c)에서의 제어입력을 나타낸다.

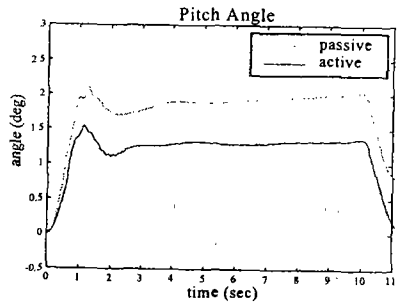


Fig. 11 Relative pitch angle during acceleration

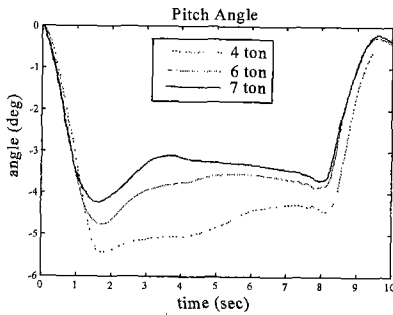


Fig. 12 Relative pitch angle during deceleration

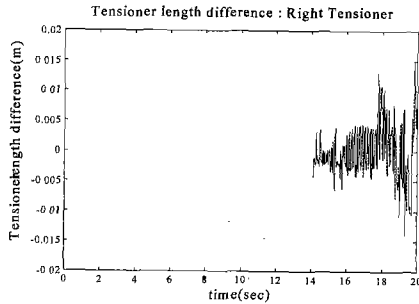


Fig. 13 Active control input in test (c)

능동형 궤도장력 조절기가 장착된 궤도차량의 동적 성능을 알아보기 위하여 주행중의 궤도차량의 피치각을 비교해 보았다. 가속의 경우의 피치각의 변화는 Fig. 11 과 같다. 결과를 살펴보면 가속시에는 능동형 궤도장력 조절기가 장착된 경우에 수동형 보다 적은 피치각의 변화를 나타냄을 볼 수 있다. 즉 승차감 면에서 우수한 성능을 보인다고 할 수 있다. 아이들러 주위의 궤도장력의 크기에 따라 피치각의 변화 양상은 틀려진다. Fig. 12 는 급감속의 경우 설정궤도장력의 크기에 따른 피치각의 변화를 나타낸 것으로 급감속시에는 아이들러 주위의 궤도장력이 높아야 함을 알 수 있다. Fig.

6. 결론

궤도차량의 궤도장력을 직접적으로 제어하기 위하여 궤도장력 추정 알고리즘, 유압장치 그리고 퍼지논리 제어를 사용한 궤도장력 제어기로 구성된 동적 궤도장력 조절시스템을 개발하였으며 그 성능을 궤도차량의 다물체 동역학 모델에 적용하여 검증하였다.

본 논문에서 개발된 이러한 동적 궤도장력 조절시스템은 궤도차량의 다양한 주행에 사용될 수 있었다. 즉, 주행시에 너무 낮은 궤도장력이 발생하는 경우 궤도장력을 높여주고 또 너무 큰 궤도장력이 발생하는 경우 궤도장력을 감소시켜 줄으로써 궤도의 이탈이나 파손을 방지할 수 있다. 또 궤도차량의 기동성이나 내구성을 향상시키기 위하여 주행중에 가장 적절한 궤도장력에 대한 연구가 이루어 진다면 본 연구에서 개발된 동적 궤도장력 조절 시스템을 이용하여 궤도장력을 제어해 줄으로써 차세대 궤도차량의 성능 확보를 이룰 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) 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*.
- (4) 허건수, 조병희, 서문석, 서일성, 박동창, 2000, "궤도차량의 직진주행시 궤도장력감지," 대한기계학회 논문집 A, 제 24 권 제 6 호, pp. 1608~1615.
- (5) Ryu, H.S., Bae, D.S., Choi, J.H. and Shabana, A., 2000, "A Compliant Tank Link Model for High-Speed, High-Mobility Tracked Vehicle," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 48, pp. 1481~1502. (accepted for publication).
- (6) Wong, J.Y., 1993, *Theory of Ground Vehicles*, 2nd ed., John Wiley & Sons.
- (7) Jang, J.-S. R., Sun, C.-T. and Mizutani, E., 1997, *Neuro-Fuzzy and Soft Computing*, Prentice Hall.