

궤도차량의 동적 궤도장력 조절시스템의 실험적 평가

허건수[†] · 서문석^{*} · 김재용^{*} · 정순규^{*} · 정정주^{**} · 김일민^{***}

A Experimental Evaluation of Dynamic Track Tensioning System in Tracked Vehicle

Kunsoo Huh, Munsuk Suh, Jaeyong Kim, Soonkyu Jeong, Chungchoo Chung and Ilmin Kim

Key Words : Tracked vehicle(궤도차량), Tension monitoring(장력감지), Tension control(장력제어), DTTS(Dynamic Track Tensioning System, 동적 궤도장력 조절시스템)

Abstract

Maintaining track tension in tracked vehicles minimizes the excessive load on the tracks and prevents the peel-off of tracks from the road-wheel, and adequately guarantees the stable and improved driving of the tracked vehicles. However, the track tension cannot be easily measured due to the limitation in the sensor technology, harsh environment, etc. In this study, the track tension is estimated in real-time from the measurable signals of tracked vehicles and controlled based on a fuzzy logic controller. The proposed control system is implemented on tracked vehicles and its performance is evaluated under various driving conditions.

1. 서 론

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 치짐이 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.

기존의 궤도차량에서는 아이들러에 연결된 수동

형 유압 궤도장력조절기에 의해 궤도장력이 조절되는데, 보통 차량무게의 10% 정도의 초기장력이 주어지며 포장도로, 야지, 피보팅(pivoting)과 같은 모드를 갖게 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. 첫 번째 방법은 아이들러와 근접한 로드암을 기계적 장치를 이용하여 연결하여 구성하였다⁽²⁾. 이는 궤도장력을 고려하지 않고 아이들러의 위치가 로드휠의 위치에 의해서만 결정되어진다. 두 번째 방법은 계산된 궤도길이(Track Path Length)에 근거하여 Oakely et al.⁽³⁾에 의해 개발되어졌으며, 계산된 궤도길이와 적정궤도길이를 비교하여 유압 액추에이터를 이용하여 아이들러의 위치를 제어한다. 그러나 위의 두 방법은 궤도장력 제어를 위해 궤도장력에 대한 정보를

[†] 한양대학교 기계공학부
E-mail : khuh2@hanyang.ac.kr
TEL : (02)2290-0437 FAX : (02)2295-4584

^{*} 국방과학연구소

^{**} 한양대학교 전자전기컴퓨터공학부

^{***} 한양대학교 대학원 정밀기계공학과

사용하지 않으며 따라서 간접 능동형 장력조절기로 분류되어야 한다.

본 논문에서는 실제로 실제 궤도차량으로부터 측정 가능한 신호들을 사용하여 아이들러와 스프로킷 주위의 궤도장력을 실시간으로 추정하는 궤도장력 감지 시스템과 퍼지논리 제어기를 사용한 제어 시스템을 구성하였으며 동적 궤도장력 조절 시스템을 실차에 적용하기 위한 실험장치를 구성하였다. 이와 같이 구성된 동적 궤도장력 조절 시스템을 실차에 적용해 실시간 궤도장력 추정과 제어성능을 실험적으로 검증하였다.

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 장에서는 동적 궤도장력 조절 시스템의 실차 실험을 위한 실험장치를 구성하였으며, 6 장에서 5 장에서 구성된 실험장치를 이용한 실시간 궤도장력 추정 및 제어 실험결과를 제시하였다. 그리고 마지막 7 장에서 결론을 맺었다.

2. 궤도장력의 추정

궤도장력을 직접적으로 제어하기 위해서는 궤도차량의 주행중에 궤도장력에 대한 정보가 실시간으로 필요하다. 그러나 궤도장력은 센서와 같은 물리적 장치를 사용하여 쉽게 측정되어질 수 없으므로 궤도차량의 동적 거동 데이터만을 사용하여 추정되어야 한다. 궤도의 운동경로 중에서 가장 큰 장력이 발생하는 곳은 주로 아이들러와 스프로킷 주위이므로 본 연구에서는 두곳에서의 장력을 추정하여 장력 제어에 사용한다.

아이들러는 궤도장력 조절기에 연결되어 있으므로 아이들러 주위의 궤도장력은 장력조절기의 압력과 위치, 아이들러와 아이들러암의 거동, 그리고 궤도와 아이들러의 접촉각의 영향을 받게 된다. 본 저자는 기 발표된 논문⁽⁴⁾에서 장력조절기의 압력, 장력조절기 및 아이들러의 기하학적 관계로부터 아이들러 주위의 장력 추정식을 유도하였다. 이 아이들러 장력 추정식은 노면형상이나 궤도차량의 운동저항등에 대한 가정없이 유도되었기 때문에 궤도차량의 어떠한 주행조건에서도 사용될 수 있다. 스프로킷 주위의 궤도장력은 아이들러 주위 장력과 로드휠 아래 궤도에서 지면과의 마찰에 의한 견인력에 의해 결정될 수 있다. 견인력은 궤도차량의 직진시⁽⁴⁾와 조향시⁽⁸⁾에 따라 다른 특성을 가지게 되는데 직진시는 직진방향과 횡방향 힘을

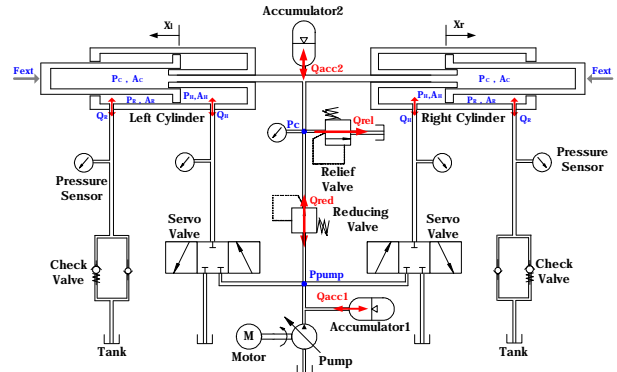


Fig. 1 The whole construction of Hydraulic system

지면의 특성식으로 표현한 후 미지 변수들을 추정하여 구해진다⁽⁴⁾. 이때 미지변수 및 상태변수는 Extended Kalman Filter 를 이용하여 실시간으로 추정된다. 조향시는 좌우 궤도의 속도차로 인한 조향저항 모멘트가 생성되고 이에 따라 견인력의 변화가 많이 일어나므로 조향저항에 대한 실험식을 이용하여 견인력을 구하게 된다⁽⁸⁾.

3. 유압장치

동적 궤도장력 조절기에서 유압시스템은 궤도장력 조절용 유압실린더에 필요한 유압동력을 제공하며, 서보밸브를 이용해 장력조절 실린더에 유입되는 유량을 조절하여 실린더의 힘을 제어하는 장치이다. 유압시스템은 압력 보상형 주유압 펌프, 전기모터, 축압기, 3단 서보밸브, 솔레노이드 밸브, 비례감압 밸브, 릴리프 밸브, 체크밸브, 실린더, 저유기, 냉각장치 등의 구성품으로 이루어지며, 시스템의 작동압력은 실린더가 최대작동 길이인 0.1515m를 제어할 수 있고 서보밸브와 관로손실 등을 고려하여 28MPa로 설정되어 있다. 이 유압시스템은 궤도장력 조절시 장력조절 실린더의 팽창시에만 유압동력을 이용하고 수축시에는 궤도장력을 이용하는 방식을 사용하였다. 본 논문에서 사용된 유압시스템의 전체 구성도는 Fig. 1에서 보여주고 있다. 이러한 유압시스템은 파워팩, 서보밸브 그리고 실린더 모델의 비선형 운동 방정식으로 모델링 될 수 있고, 그 수학적 모델식은 다음과 같이 나타낼 수 있으며 자세한 특성은 Im⁽⁵⁾에 주어졌다.

Power Pack Model

$$\dot{V}_{pump} = \frac{b}{V_{pump}}(Q_{th} - Q_{leak} - Q_{acc1} - Q_{red} - Q_{th1} - Q_{th2}) \quad (1)$$

여기서 P_{pump} 는 펌프의 압력, V_{pump} 는 펌프의 체적이며, Q_{th} 는 이론적 유량, Q_{leak} 는 손실 유량, Q_{acc1} 는

축압기 유량, Q_{red} 는 감압밸브 유량, $Q_{Hin,l}$ 와 $Q_{Hin,r}$ 는 서보밸브 유량, b 는 오일의 체적탄성계수이다.

Cylinder Model

$$M \ddot{x} = P_H \cdot A_H + P_C \cdot A_C - P_R \cdot A_R - F_{ext} - \text{sgn}(\dot{x})F_s - B \cdot \dot{x} \quad (2)$$

- 실린더 헤드

$$\dot{P}_H = \frac{b}{V_H} (Q_H - A_H \cdot \dot{x}) \quad (3)$$

- 실린더 로드

$$\dot{P}_R = \frac{b}{V_R} (A_R \cdot \dot{x} - Q_R) \quad (4)$$

- 실린더 챔버

$$\dot{P}_C = \frac{b}{V_C} (Q_{red} - Q_{rel} - Q_{acc2} - A_C \cdot \dot{x} - A_C \cdot \dot{x}) \quad (5)$$

여기서 P_H 는 헤드측의 압력, P_R 는 로드측의 압력, P_C 는 챔버측의 압력, V_H 는 헤드측의 체적, V_R 는 로드측의 체적, V_C 는 챔버측의 체적, Q_H 는 헤드측의 유량, Q_R 는 로드측의 유량, Q_C 는 챔버측의 유량이며, x 는 장력 조절기의 길이를 나타낸다.

Servo Valve Model

$$X_v = \frac{w_n^2}{s^2 + 2z w_n s + w_n^2} \cdot U_n \quad (6)$$

- 실린더 헤드(P_H)와 관련된 유량(Q_H)

$$\begin{aligned} X_v > 0: Q_{Hin} &= K_q \cdot X_v \cdot \sqrt{P_{pump} - P_H} \\ X_v < 0: Q_{Hout} &= K_q \cdot X_v \cdot \sqrt{P_H - P_T} \\ X_v = 0: Q_{Hin} &= Q_{Hout} = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

- 파워팩(P_{pump})과 관련된 유량(Q_{Hin})

$$\begin{aligned} X_v > 0: Q_{Hin} &= K_q \cdot X_v \cdot \sqrt{P_{pump} - P_H} \\ X_v \leq 0: Q_{Hin} &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 U_n 은 서보밸브의 제어 입력, P_T 는 저유기의 압력, K_q 는 서보밸브의 유량계인을 나타낸다.

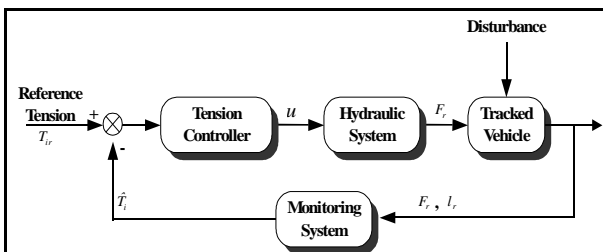


Fig. 2 Block diagram of the DTTS

4. 퍼지논리 제어기 설계

케도차량의 주행시에 케도장력은 주행조건이나 노면조건 등에 따라서 매우 비선형적으로 변하고 또 케도장력조절을 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, 퍼지추론, 퍼지제어규칙 그리고 비퍼지화로 구성되어 있다.

Fig. 2는 케도장력을 추정하고 추정된 정보를 이용하여 케도장력을 제어하는 케도장력 제어시스템의 블록 다이어그램을 나타낸 것이다. 장력조절기에서 작용하는 힘과 장력조절기의 길이 등을 측정하여 모니터링 시스템에서 아이들러 주위의 케도장력을 추정하고, 추정된 케도장력을 토대로 퍼지논리 제어기로 구성된 장력 제어기에서 유압장치로 제어 입력이 주어지면 케도장력 조절기의 유량이 제어되어 장력조절기에 힘을 작용하게 된다.

퍼지논리 제어기에서 입력과 출력인 e , Δe 그리고 Δu 는 각각 기준 케도장력과 현재 케도장력의 오차, 오차의 변화율 그리고 제어명령의 증분이며 각각 5개의 언어변수를 가진 삼각형의 소속함수(triangular membership function)로 나타내고 정규화한 후 스케일 계수를 적용하여 사용하였다.

Fig. 3은 사용된 제어기의 구성을 나타내며, 입력과 출력의 상호 관계는 Table 1과 같은 퍼지제어규칙으로 구성하였다.

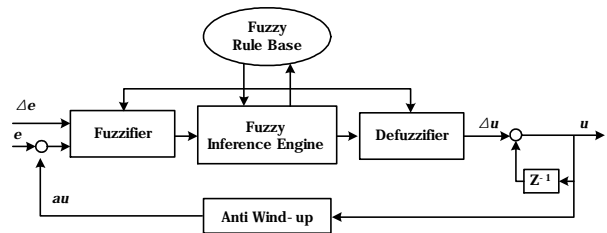


Fig. 3 Fuzzy logic control system

Table 1 The rule base of the FLC

de/dt \ e	NB	N	Z	P	PB
NB	NB	Z	Z	PB	Z
N	Z	NB	N	Z	Z
Z	NB	N	Z	P	PB
P	Z	Z	Z	PB	Z
PB	Z	Z	Z	Z	PB

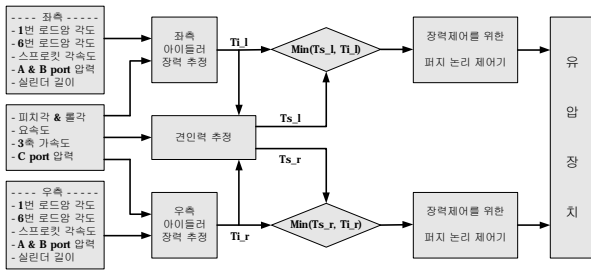


Fig. 4 Track tension estimation and control system

Fig. 4는 궤도차량으로부터 얻을 수 있는 정보를 이용하여 아이들러 주위의 궤도장력과 스프로킷 주위의 궤도장력을 추정하는 궤도 장력 감지 시스템과 두 궤도장력 중 최소장력을 판단하여 퍼지 논리 제어기의 입력으로 사용하는 궤도장력 조절 시스템을 나타낸다.

아이들러 주위의 궤도장력은 장력조절기에서 작용하는 힘, 장력조절기의 길이, 첫번째 로드암각, 아이들러의 회전 각속도를 측정하여 궤도장력 감지 시스템에서 추정되어질 수 있고 피치각, 롤각, 3축의 가속도의 측정으로부터 견인력을 추정할 수 있으며 아이들러 주위의 궤도장력과 견인력으로부터 스프로킷 주위의 궤도장력을 추정할 수 있다. 추정된 궤도장력과 기준궤도장력의 오차와 오차의 변화율을 퍼지논리 제어기의 입력으로 사용하며 제어기로부터 유압시스템의 서보밸브 제어입력 신호를 출력하여 장력 조절기의 힘으로 작용시켜 아이들러 및 스프로킷 주위의 궤도장력을 제어하게 된다.

본 논문의 제어기에서는 정하중 보상, 최소 장력 제어, 길이제한, 적분 누적방지 등의 제어 알고리즘이 사용되었다. 퍼지추론은 Mamdani의 추론 방식⁽⁷⁾을 사용하였으며, 비퍼지화는 통상적으로 사용되는 무게 중심법을 사용하였다.

본 연구에서 사용되는 퍼지 제어기에서 왼쪽과 오른쪽 각각 4 개씩 8 개의 스케일 계수를 결정하기 위해 궤도차량의 다물체 동역학 모델⁽⁶⁾과 3장에서 구성된 유압장치 모델⁽⁵⁾ 그리고 Matlab Simulink의 퍼지 제어기를 토대로 시뮬레이션에 활용하였다. 그 후 실제 궤도차량에서 실험을 하면서 noise 문제를 고려하여 퍼지 제어기의 스케일 계수가 조정되었다.

5. 실험장치 구성

동적 궤도장력 조절 시스템의 실험장치는 Fig. 4와 같이 구성되어진다. 아이들러 주위의 장력은 궤도장력조절기의 힘, 궤도장력조절기의 길이, 아

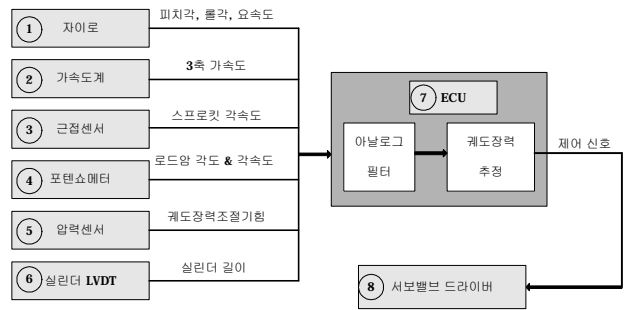


Fig. 5 Experiment configuration of DTTS

이들러의 회전 속도 그리고 첫번째 로드암의 각도에 의해서 실시간으로 구해지고 스프로킷의 궤도장력은 측정 변수인 직진방향-횡방향 속도, 직진방향-횡방향 가속도, 양쪽 스프로킷의 회전속도 그리고 피치각-롤각-요속도에 의해서 추정된다.

측정변수는 Fig. 5와 같이 ①부터 ⑥의 센서를 이용하여 측정하였으며 측정된 값은 추정 및 제어 시스템이 다운로드 되어있는 ECU⑦에 입력되어 실시간으로 아이들러 주위와 스프로킷 주위의 궤도장력을 추정하고 제어명령을 전기 신호로 출력한다. 제어명령은 서보밸브 드라이브⑧로 입력되어 궤도장력 조절기의 유량을 제어하게 된다.

Fig. 6의 전자제어장치(ECU)는 서보밸브 드라이브로 전기적인 신호를 보내어 장력 조절실린더를 제어하는 장치이며 TI사의 167MHz TMS320C6701을 사용한 DSP(Digital Signal Processing) 보드③, I/O(input/output) 보드④, 전원보드 ② 그리고 샤시 ①로 구성되어 있다.

DSP 보드는 궤도장력 추정 및 제어 알고리즘이 실행되며 제어명령을 출력시켜주며, I/O 보드는 계측시스템으로부터 입력되는 센서값을 DSP 보드에 전달해주며 DSP 보드에서 출력된 제어명령을 서보밸브 드라이브에 전송해주는 장치이다. 그리고 전원보드는 DSP 보드에 전원을 공급해주는 장치이다.

모니터링 어플리케이션은 노트북 컴퓨터에서 실행되어지며 각각의 파라미터에 대한 다양한 방식



Fig. 6 DTTS ECU

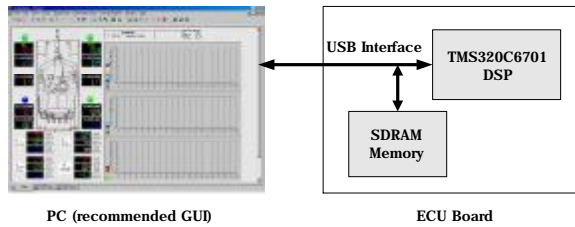


Fig. 7 Monitoring Application

의 모니터링과 필요한 데이터의 저장 그리고 실시간 온라인 파라미터 업데이트를 수행한다. 이와 같은 기능을 수행하기 위하여 Fig. 7 과 같이 노트북 컴퓨터와 전자제어장치(ECU)는 USB 인터페이스를 통하여 정보를 주고 받을 수 있도록 구성하였다.

6. 실험 결과

앞 장에서 구성한 실험장치를 실차에 적용하여 실시간으로 궤도장력을 추정하고 제어하였으며 모니터링 어플리케이션을 사용해 저장된 결과를 나타내었다.

(a) 급가속 급감속 주행

평면 노면에서 정지상태에서 40 km/h 의 속도까지 급가속후 10 초동안 0 km/h 의 속도로 급감속할 때 궤도장력이 제어되는 결과를 Fig. 10 에 나타내었다.

(b) 종경사면 하향 주행

종경사면 주행에 사용된 경사면은 -30%(16.7°)이며 Fig. 8는 -30%의 경사면을 보여주고 있다. 경사면 주행실험에서 궤도장력이 제어되는 결과를 좌측 궤도의 경우 Fig. 11에 나타내었다.

(c) 횡경사면 주행

종경사면 주행에 사용된 노면은 Fig. 9 과 같이 20%(11.3°), 30%(16.7°)의 경사각을 가지는 횡경사면으로 구성되어 있다. 이 때 궤도장력이 제어되는 결과를 좌측 및 우측 각각에 대해 Fig. 12 및 Fig. 13 에 나타내었다.

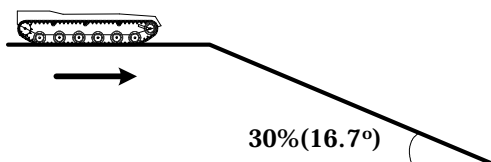


Fig. 8 Longitudinal sloping road with -10% slant

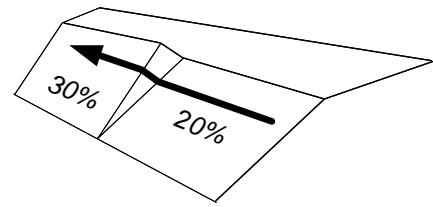


Fig. 9 Lateral slope with 20% & 30% slant

(d) 피보팅

피보팅은 좌우 스프로킷을 반대방향으로 회전하면서 차량이 제자리에서 회전하는 것을 말한다. 본 실험에서는 양쪽 스프로킷이 5km/h 의 일정한 속도로 회전할 때 좌-우측 궤도장력이 제어되는 결과를 Fig. 14, Fig. 15 에 각각 나타내었다.

각 실험에서 기준 궤도장력은 4 톤(39226.6 [N])이며 추정된 아이들러와 스프로킷 주위의 궤도장력을 비교하여 낮은 값을 제어하였다. 결과를 살펴보면 제어 대상인 낮은 장력이 원하는 기준장력을 잘 유지함을 볼 수 있었다.

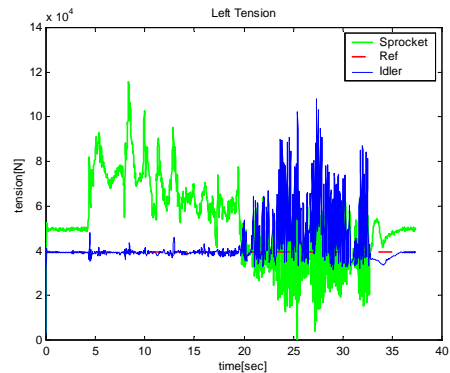


Fig. 10 Left tension for forward driving

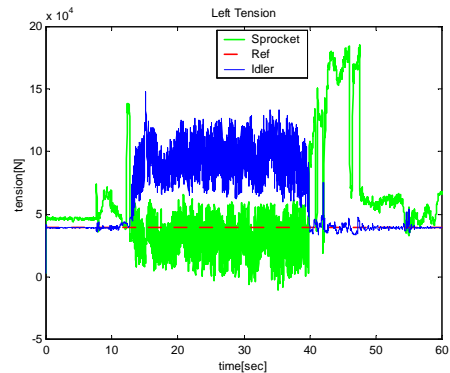


Fig. 11 Left tension for driving on -30% longitudinal slope

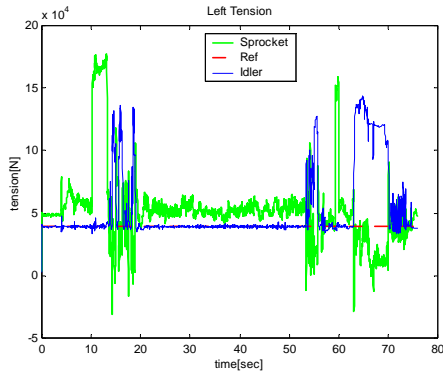


Fig. 12 Left tension for driving on lateral slope

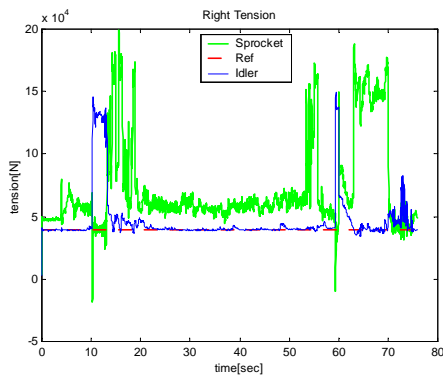


Fig. 13 Right tension for driving on lateral slope

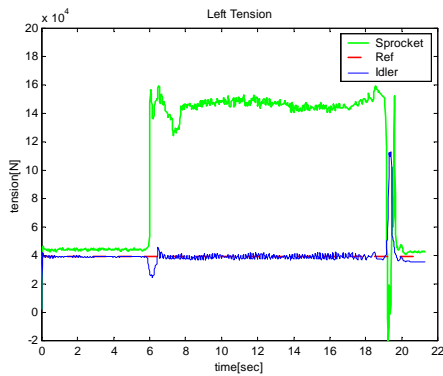


Fig. 14 Left tension for pivoting right

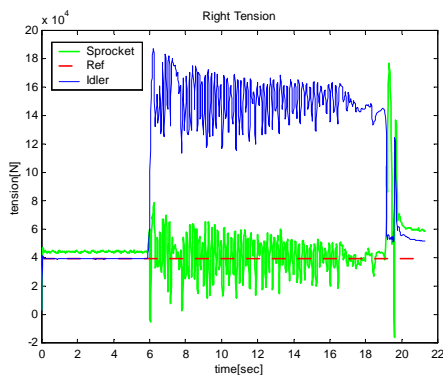


Fig. 15 Right tension for pivoting right

7. 결론

궤도차량에 가속도계, 자이로, 근접센서, 압력센서, LVDT, 유압공급장치, 전자제어장치 등을 설치하여 궤도장력 조절 시스템을 구성하였으며 실시간으로 궤도차량의 아이들러와 스프로킷 주위의 궤도장력을 추정하고 제어하는 실험을 통해 동적 궤도장력 조절시스템의 성능을 검증하였다. 본 논문에서 개발된 이러한 동적 궤도장력 조절시스템은 궤도차량의 다양한 주행에 사용될 수 있었으며, 여러 구동조건에서 실험한 결과 원하는 장력 값을 잘 추종함을 확인할 수 있었다. 즉, 주행시 필요한 최소의 장력을 유지해줌으로써 궤도의 이탈이나 파손을 방지할 수 있다. 본 연구에서 개발된 동적 궤도장력 조절 시스템을 이용하여 궤도장력을 제어해 줌으로써 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 Tacom on the Active Suspension Scorpion (P3) Tank," *NTIS Report #ADA282723*.
- (4) Huh, K., Cho, B., Suh, M., Seo, I., Park, D., 2000. "Track Tension Monitoring in the Longitudinal Traveling of Tracked Vehicles," *Transaction of the KSME A*, Vol. 24, No. 6, pp. 1608-1615.
- (5) Im, H., 2002, "Hydraulic System Modeling and Simulation Tool Development for the Design of Track Tension Controller in Tracked Vehicle," M. S. Thesis, Hanyang University, Seoul, pp. 14-25.
- (6) Ryu, H.S., Bae, D.S., Choi, J.H. and Shabana, A., 2000, "A Compliant Track Link Model for High-Speed, High-Mobility Tracked Vehicles," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 48, No. 10, pp 1481-1502.
- (7) Jang, J.-S. R., Sun, C.-T. and Mizutani, E., 1997, *Neuro-Fuzzy and Soft Computing*, Prentice Hall.
- (8) Huh, K., Cho, B., Choi, J. H., 1999, "Development of a Track Tension Monitoring System in Tracked Vehicles," *Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division*, Vol. 67, pp. 461~468.