

궤도차량의 동적 궤도장력 조절시스템을 위한 시뮬레이션 툴 구축

김일민^{**} · 김민철^{**} · 임훈기^{**} · 허건수^{*}

Simulation Tool Development for Dynamic Track Tensioning System in Tracked Vehicles

Ilmin Kim, Minchul Kim, Hunggi Im and Kunsoo Huh

Key Words : Tracked vehicle(궤도차량), Tension monitoring(장력 감지), Tension control(장력 제어), DTTS(동적 궤도장력 조절시스템)

Abstract

The characteristics of the track are important concerning the mobility of tracked vehicles. It can be represented in terms of the track tension and maintaining the track tension adequately guarantees the stable and improved driving of the tracked vehicles. The track tension must be known in order to be controlled and it needs to be estimated in real-time because it is difficult to be measured. The tension around idler and sprocket can be controlled by the fuzzy logic control system base on the estimated values. Dynamic Track Tensioning System(DTTS) which is estimating and controlling the track tension. In this paper, simulation tool is developed in order to apply the DTTS to real battle tanks. To construct the simulation tool, the Modeling the tracked vehicle, constructing estimation system, and designing controller should be achieved first and then all subsystem should be organized in one. The simulation tool make the RecurDyn model of tracked vehicle, which is plant model, and the control system exchange their data simultaneously. Simulation with many kinds of driving conditions and road conditions is carried out and the results are interpreted. The interpretation provides necessary information to apply the DTTS to real battle tanks.

1. 서론

궤도차량은 스프로킷, 아이들러, 로드휠 그리고 서포트롤러를 궤도가 감싸고 있으며 궤도의 회전으로 궤도와 지면 사이에 발생하는 견인력에 의해 구동하게 된다. 궤도차량의 주행에 있어서 궤도의 거동은 중요한 요소로 작용하는데 특히 군용 전차와 같은 고속 궤도차량 경우는 궤도의 거동을 면밀히 분석해서 보다 안정한 주행을 확보하는 연구가 필요하게 된다. 궤도의 거동은 궤도가 아이들러와 스프로킷 등의 부위를 지날 때의 궤도장력을 통해서 파악할 수 있다. 궤도장력은 급가속, 급감

속을 하거나 급격한 조향을 할 때와 같은 주행조건이나 경사면을 오르거나 내릴 때, 험지를 주행할 때와 같은 노면조건에 의해 급격하게 변화하는데 이러한 궤도장력의 급격한 변화를 적절히 조절하지 못하면 궤도의 이탈이나 수명저하 및 원하지 않는 궤도의 진동을 야기시킨다. 그러므로 궤도차량의 안정한 주행을 위해서는 이러한 궤도장력 변화의 특성을 파악하고 적절한 장력을 유지시키기 위해서는 궤도장력 조절기가 필요하다. 기존의 궤도차량에서는 수동형 유압 궤도장력조절기를 사용하여 궤도장력을 조절한다. 수동형 장력조절기는 포장모드와 야지모드를 가지고 있으며 각 모드는 다소 차이는 있지만 차량 무게의 10%정도의 초기장력이 주어진다. 하지만 궤도차량이 다양한 주행조건과 노면조건을 주행할 경우 이러한 두 모드에 의한 초기장력 설정은 궤도장력을 적절하게 유지

^{**} 한양대학교 대학원 정밀기계공학과

^{*} 한양대학교 기계공학부

시킬 수 없다. 그러므로 궤도차량이 다양한 상황에서 주행할 때 능동적으로 궤도장력을 조절할 수 있는 동적 궤도장력 조절시스템(Dynamic Track Tensioning System, DTTS)의 개발이 필요하다.

동적 궤도장력 조절시스템을 개발하기 위해서는 우선 궤도장력을 실시간으로 추정할 수 있어야 하며 추정된 궤도장력을 기반으로 궤도장력 제어기를 설계해야 한다. 궤도장력 감지시스템과 궤도장력 제어시스템을 포함한 전체 시스템이 실차에 적용되기 위해서는 궤도차량을 모델링한 후 다양한 주행조건 및 노면조건에서 시뮬레이션을 수행하여 제어기 설계에 필요한 여러가지 정보들을 얻을 수 있어야 한다. 이러한 전체 시스템의 시뮬레이션을 수행하기 위해서 시뮬레이션 툴의 개발이 필요하게 되었다.

수동형 궤도차량의 시뮬레이션을 위한 모델링은 동역학 해석 프로그램인 RecurDyn에서 이루어졌지만 이 모델은 궤도장력 제어 시스템을 포함하고 있지 않기 때문에 동적 궤도장력 조절 시스템 설계를 위한 시뮬레이션 툴로는 적합하지 않다. 그러므로 제어기와 능동형 궤도장력 조절기에 사용되는 유압장치를 포함한 궤도장력 제어시스템은 제어기 설계에 용이한 Simulink에서 모델링하고 기존 수동형 궤도차량의 RecurDyn 모델을 개선하여 능동형 모델을 만든 후 두 시스템이 서로 정보를 교환하는 방식의 통합적인 시뮬레이션 툴의 구성이 요구된다.

기존의 연구에서 궤도의 장력이 작을 때에는 궤도장력의 변화와 궤도길이의 변화가 같은 양상을 보여 주지만 궤도장력이 클 때에는 궤도길이의 상관관계가 없다고 보고된 바 있다. 따라서 궤도길이를 이용한 궤도장력을 조절하는 방식에는 한계가 있으며 궤도장력을 직접 제어하는 동적 궤도장력 조절시스템을 실현하기 위해서는 실시간 궤도장력 정보가 필요하다. 이에 Huh et al.⁽¹⁾은 아이들러 어셈블리의 기하학적 구조와 확장된 칼만 필터(Extended Kalman Filter, EKF)를 이용하여 궤도차량이 평면에서 직진주행시에 실시간으로 주요 부위에서의 궤도장력을 추정하였다. 또한 Huh et al.⁽¹⁾은 동적 궤도장력 조절 시스템에서 궤도길이를 이용하지 않고 평면주행뿐 아니라 다양한 궤도차량의 주행상황의 경우에 대하여 직접 궤도장력을 감지하여 감지된 궤도장력을 바탕으로 궤도장력을 직접 제어하는 방식을 제안하였다. 제안된 동적 궤도장력 조절 시스템을 실차에 적용시키기 위해서는 다양한 조건하에서의 궤도장력 제어 시뮬레이션이 요구되지만 기존의 시뮬레이션 방식은 이러한 요구를 충족시키기에 부족한 점이 많았다.

본 논문에서는 동적 궤도장력 조절시스템을 통합적으로 설계하고 이를 위해 필요한 궤도차량의 궤도장력 제어 시뮬레이션 툴을 구성하였다. 궤도장력 제어 시뮬레이션 툴⁽⁶⁾은 본 논문에서 대상으로 삼은 궤도차량을 위해 구성되었으며 궤도차량은 약 1000자유도 정도의 복잡한 시스템이며 전체 차량모델은 189개의 강체와 36개의 레볼류트 조인트 그리고 152개의 부상 요소로 구성된 다물체 동역학 시스템으로 구성되어 있다. 이러한 운동방정식을 풀기위해 회귀적 방법과 명시적 수치 적분 방식을 사용해 Matlab의 Simulink에서 설계된 제어기와 RecurDyn에서 모델링된 플랜트 사이에서의 상호 정보가 교환되면서 동시에 시뮬레이션 된다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 궤도장력 제어를 위해 필요한 궤도장력을 추정하였고, 3장에서는 궤도장력 제어 시스템을 구성하는 유압장치 모델, 퍼지제어기와 궤도장력 제어 방식을 설명하고, 4장에서 궤도장력 제어 시스템의 설계를 위한 Matlab-RecurDyn Interfacing 시뮬레이션 툴을 구성하였다. 5장에서는 4장에서 구성된 시뮬레이션 툴을 이용한 궤도장력 제어 시뮬레이션이 이루어 졌으며 동적 궤도장력 조절 시스템이 실차에 적용되기 위해 필요한 퍼지제어기의 스케일 계수와 적정궤도장력 및 적정 길이를 제안하고 있다. 그리고 마지막 6장에서 결론을 맺었다.

2. 궤도장력의 추정

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

궤도장력의 제어는 아이들러에 부착된 능동형 궤도장력 조절기로부터 수행되므로 궤도의 여러

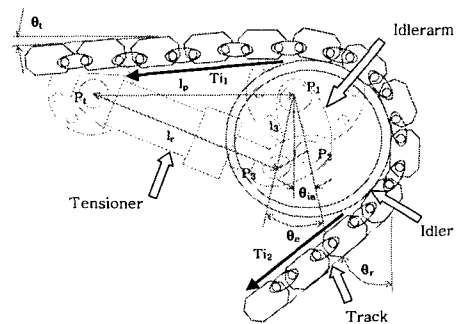


Fig. 1 Geometry of the idler and the track tensioner

부분 중 아이들러 주위의 궤도장력을 추정하는 방법만을 설명한다. 아이들러는 궤도장력 조절기를 지지하고 있으며 궤도장력을 유지하기 위하여 스프로킷과 로드휠로부터 궤도를 유도한다. 아이들러와 아이들러암 그리고 궤도장력조절기의 기하학적 형상은 Fig. 1에 나타난 것과 같다.

궤도장력에 영향을 미치는 요소로는 장력조절기의 압력과 위치, 아이들러와 아이들러암의 동적 성분, 그리고 궤도가 아이들러에 접할 때의 접촉 각이다. 그리고 아이들러 관성의 영향은 궤도장력에 비해 아주 작으므로 아이들러 주위의 궤도장력은 일정하다고 가정할 수 있다. 아이들러, 아이들러암과 장력조절기의 기하학적 관계를 토대로 아이들러 주위의 궤도장력은 식 (1)과 같이 계산되어질 수 있다. 식 (1)의 상세 유도는 허건수 등⁽²⁾(2000)에서 주어졌다.

$$\hat{T}_{11} \approx \hat{T}_{12} \approx \frac{F_r l_3 \cos(\theta_j + \theta_{a_j} + \theta_{r_j}) - m a g l_c \sin \theta_{a_j} + F_{c_j} - m g \sin \theta_{a_j}}{l_1 \cos(\theta_{a_j} - \theta_{r_j}) + \sin(\theta_{a_j} + \theta_{r_j})} \quad (1)$$

위 장력 추정식은 궤도차량의 어떠한 주행조건에서도 사용되어질 수 있다. 왜냐하면 위 식이 노면의 형상이나 궤도차량의 운동저항 등에 대하여 어떠한 가정도 없이 유도되었기 때문이다. 아이들러 주위의 궤도장력은 궤도장력 조절기의 압력과 길이 그리고 로드암 #1의 각도의 측정에 의하여 계산되어 진다.

3. 궤도장력 제어 시스템

3.1 유압장치

동적 궤도장력 조절기에서 유압장치는 궤도장력 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 궤도의 가능한 최대부하 하중조건을 약 23톤으로 가정하고 유압 서보밸브와 관로 손실등을 고려하여 320kgf/cm²으로 설정되어 있다. Fig. 2는 본 논문에서 사용된 유압장치의 개략도를 나타낸다. 유압장치에 사용된 주유압 펌프는 압력보상형 펌프를 사

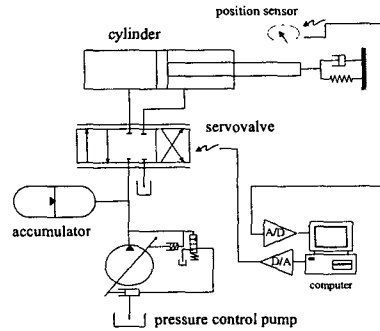


Fig. 2 Hydraulic system

용하며 유압장치의 설정압력이 320 kgf/cm²에 도달하면 내부 사판을 제로유량 상태로 보내 불필요한 에너지가 릴리프 밸브를 통하여 열로 소모되는 것을 방지하였고, 궤도장력 조절 실린더가 정상 작동위치에서 최대 작동위치까지 0.5초 내에 이동 가능하도록 축압기를 사용하여 순시동력이 증가되도록 설계되어 있다. 또 서보밸브의 개구면적비가 편로드 실린더의 수압면적비와 동일한 4웨이 밸브를 채택하였다. 이 유압장치는 궤도장력 조절시 조절실린더의 팽창시만 유압동력을 이용하고 수축시에는 궤도장력을 이용하는 방식과 팽창, 수축시 모두 유압동력을 사용하는 2가지 방식으로 작동할 수 있도록 설계되어 있는데 본 논문에서는 후자의 방식을 택하여 사용하였다. 이러한 유압장치는 파워팩 모델, 서보밸브 모델 그리고 실린더 모델은 비선형 운동방정식으로 모델링되며 그 모델식은 허건수 등⁽³⁾(2001)에서 주어졌다.

3.2 퍼지 제어기

궤도차량의 주행시 궤도장력은 주행조건이나 노면조건 등에 따라서 매우 비선형적으로 변하며 또 궤도장력조절을 담당하는 유압장치도 강한 비선형성을 띠고 있다. 이러한 비선형 시스템을 제어하기 위하여 퍼지논리 제어기를 사용하였다.

본 논문에서의 퍼지논리 제어기는 퍼지화, 퍼지 추론, 퍼지제어규칙 그리고 비퍼지화로 구성되어 있다. Fig. 3은 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.

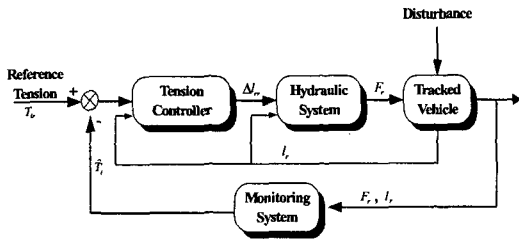


Fig. 3 Block diagram of the DTTS

유압장치에서의 길이제어는 비례 제어를 사용하며 최대 약0.5초의 시간지연(time delay)을 가지고 있다. 퍼지논리 제어기에서 입력과 출력인 eT_n , deT_n/dt 그리고 ΔT_n 은 각각 기준 궤도장력과 현재 궤도장력의 오차, 오차의 변화율 그리고 장력조절기의 길이를 나타내며, 각각 모두 5개의 언어변수를 가진 삼각형의 소속함수⁽³⁾로 나타내고 정규화⁽³⁾한 후 스케일 계수를 적용하여 사용하였다. 퍼지 추론은 Mamdani의 추론 방식⁽⁷⁾을 사용하였으며, 비퍼지화는 통상적으로 사용되는 무게중심법을 사용하였다.

3.3 궤도장력제어방식

아이들러 주위의 궤도장력을 추정하고 추정된 궤도장력과 기준장력의 오차 및 오차변화율을 입력으로 받으면 퍼지논리 제어기로 구성된 장력제어기에서 출력인 궤도장력 조절기의 길이 변화량을 발생시킨다. 길이 변화량 명령은 유압장치를 통해

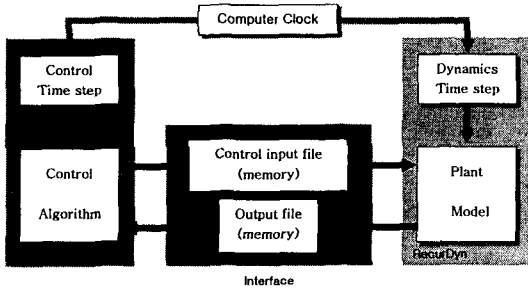


Fig. 4 Matlab-RecurDyn Interface

장력조절기의 힘으로 작용하여 아이들러 주위의 궤도장력을 제어하게 된다.

4. 동적 궤도장력 조절 시스템을 위한 시뮬레이션 틀

Matlab-RecurDyn Interfacing 이란 Matlab의 Simulink 에서 설계된 제어기와 RecurDyn에서 모델링된 플랜트 사이에서의 상호 정보가 교환되면서 동시에 시뮬레이션 되게 하는 기술이다. 이 기

술은 플랜트의 모델링이 이루어진 후에 이에 적용될 제어기의 설계 및 검증을 위한 시뮬레이션에 응용된다. Fig. 4의 블록 다이어그램은 Matlab-RecurDyn Interface의 기본적인 개념을 나타낸다. Matlab-RecurDyn Interfacing을 이용한 시뮬레이션을 하기 위해서는 두 프로그램 상호간에 정보를 주고 받아야 하며 그러기 위해서는 같은 step size로 동작 되어야 한다. 즉 RecurDyn은 플랜트의 정보를 Simulink로, Simulink는 제어명령을 RecurDyn으로 보내야 하는데 RecurDyn은 내부적으로 변동 step size를 가지고 있기 때문에 이를 Simulink와 공유하기 위해서는 입출력의 충돌을 방지하기 위해 서로 다른 프로그램의 일시 정지와 실행 및 재가동을 해야 한다. Matlab과 RecurDyn이 상호 파일(메모리)공유에 의해서 데이터를 교환하며 동시에 시뮬레이션이 되기 위해서 Matlab에서는 C/C++ 코드로 작성된 S-function을 사용하여 공유파일(메모리)에 입출력을 작성하고 RecurDyn의 시뮬레이션을 제어하기 위한 임시파일(메모리)에 이벤트를 발생시키도록 하였고 RecurDyn에서는 Fortran으로 작성된 Subroutine을 공유파일(메모리)에 입출력을 작성하고 Matlab의 시뮬레이션을 제어하기 위한 임시파일(메모리)에 이벤트를 발생시키도록 하였다. 이와 같은 방법으로 Matlab과 RecurDyn은 각각의 Step size를 가지고 동작함으로써 서로의 충돌을 방지하면서 데이터를 공유 할 수 있게 된다.

본 연구에서 능동형 궤도장력조절기를 장착한 궤도차량을 RecurDyn에서 모델링하였고 퍼지제어를 이용한 궤도장력 제어기는 궤도장력 추정 알고리즘 및 유압장치 모델과 더불어 Simulink에서 설계되었다. Fig. 5에서 볼 수 있는 바와 같이 시뮬레이션 틀은 RecurDyn 궤도차량 모델, 궤도장력 감지시스템, 퍼지 제어기, 유압장치, 기준 궤도장력 및 기준 궤도 길이 설정부분으로 구성되어 있다. 이 중 궤도장력 감지시스템은 C-언어로 된 S-function블록으로 구성되어 있고 아이들러 주위의 장력과 직진 및 조향시 스프로킷 주위의 장력을 추정한다.

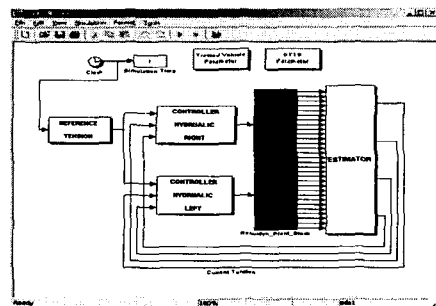


Fig. 5 Simulink model of the simulation tool for DTTS

5. 시뮬레이션

동적 궤도장력 조절 시스템을 설계하기 위해서는 차량의 주행상황을 기술하는 차량속도, 가속도, 노면상황 등의 변수들을 조정해 가면서 각 주행조건별로 다양한 시뮬레이션을 수행해야 한다. 이러한 시뮬레이션의 결과분석을 통해서 주행성능과 안정성 및 내구도를 보장하는 동적 궤도장력 제어 시스템을 구성할 수 있는 정보들을 얻을 수 있다. 궤도장력 제어 시스템을 구성하기 위해서는 주행상황별 궤도차량이 필요로 하는 적정 장력 및 적정 길이를 도출해야 하며 이를 바탕으로 퍼지제어를 설계한 후 제어기의 성능 검증해야 한다.

본 시뮬레이션에서는 각 주행상황별 궤도차량의 적정 궤도장력 및 길이를 도출하고 퍼지제어기 설계에 있어서의 적정 스케일 계수를 설정하였으며 다음과 같이 그 성능을 비교 검토하였다.

5.1 직진 주행

다양한 노면과 속도입력에 따른 궤도장력의 제어성능을 검증하기 위하여 Table 1에 있는 4가지의 경우에 대하여 시뮬레이션 하였다. 이 중 기준장력은 차량의 정지(5초), 가속(10초), 등속(10초), 감속(10초)시의 네 가지 값을 가지며 퍼지 제어기는 입력(G_{i1}, G_{i2})과 출력(G_o)의 세가지 스케일 계수를 갖는다.

(a) 가속후 등속 감속 주행

평면 노면에서 등속 구간의 속도는 30 km/h로 시뮬레이션 하였다.

(b) 중경사면 주행

사용된 노면은 Fig. 6과 같이 10%의 경사각을 가지는 중경사면으로 구성되어 있으며 차량 속도는 등속구간에서 10km/h가 되도록 하였다.



Fig. 6 Longitudinal sloping road with 10% slant

(c) 횡경사면 주행

사용된 노면은 Fig. 7과 같이 최대 18°의 경사각을 가지는 중경사면과 최대 30°의 경사각을 가지는 횡경사면으로 구성되어 있으며 차량 속도는 등속 구간의 속도가 10 km/h가 되는 속도입력을 주었다.

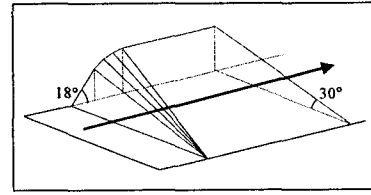


Fig. 7 Lateral slope with 30% slant

(d) 험지(PROFILE IV)

Profile IV는 아래 Fig. 8과 같이 다양한 크기의 삼각형과 사각형의 요철로 구성되어 있는 노면이며 삼각형 요철의 최고높이는 약 0.3m 그리고 사각형 요철의 높이는 약 0.075m 정도이다. 그리고 차량 속도는 등속 구간의 속도가 10 km/h가 되는 속도입력을 주었다.

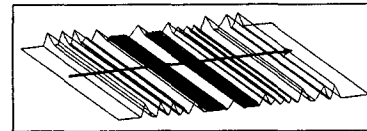


Fig. 8 Rough road profile (Profile IV)

시뮬레이션 결과는 Fig. 9 ~ Fig. 12에 나타내었는데 결과를 살펴보면 제어 대상인 아이들러 주위의 궤도장력은 원하는 기준장력을 잘 유지함을 볼 수 있었고, 노면의 변화가 심한 경우 즉 험지 주행의 경우 경우 궤도장력의 변화정도가 적어지며 기준장력을 잘 추종하였다. 적정 퍼지 입출력 스케일 계수는 시뮬레이션 된 장력의 제어 결과를 바탕으로 선정할 수 있다. 직진의 경우 속도와 가속도가 기준이 되고 중경사나 횡경사의 경우 경사도와 속도, 가속도가 기준이 된다. 험지의 경우 속도와 가속도가 기준이 된다. 입력의 경우 퍼지 제어기의 입력인 오차와 오차 변화율이 경계값의 40~50%에 달하는 결과를 발생시키는 계인이 적절하다. 출력의 경우 장력의 변화량에 따라 달라져서 장력변화가 큰 경우는 큰 스케일 계수를, 장력변화가 작은 경우 작은 값을 선정해야 한다.

Table 1 Simulation configuration

Case	기준장력 (ton)	G_{i1}	G_{i2}	G_o
(a)	5,5,6,7	1/20000	0.0001/20000	0.01
(b)	5,6,7,7	1/20000	0.0001/20000	0.01
(c)	5,5,6,7	1/30000	0.0001/30000	0.01
(d)	5,5,6,6	1/30000	0.0001/30000	0.02

6. 결론

동적 궤도장력 조절 시스템을 실차에 적용시키기 위한 시뮬레이션 툴을 개발하였다. 시뮬레이션을 위해 궤도장력이 실시간으로 추정되었으며 퍼지제어기를 이용하여 유압 장력조절기에 의해 구동되는 궤도장력 제어 시스템을 구성하였다. 구성된 각 시스템이 유기적으로 결합하여 서로 정보를 주고 받으며 시뮬레이션이 되게 하는 시뮬레이션 툴의 구성을 위해서 Matlab-RecurDyn Interfacing 방식을 사용하였다. 구성된 시뮬레이션 툴을 이용하여 궤도차량이 다양한 상황에서의 주행할 때 동적 궤도장력 조절시스템의 작동을 시뮬레이션 하였으며 이를 분석하여 퍼지 제어기의 입출력 스케일 계수와 적정 궤도장력 및 적정 길이 등과 같이 실차 적용에 필요한 개별적 설계 변수들을 제시하였다.

본 논문에서 개발된 이러한 시뮬레이션 툴을 이용한 궤도차량의 다양한 주행상황 시뮬레이션을 통해 궤도차량의 기동성이나 내구성을 향상시키기 위한 적절한 궤도장력에 대한 연구를 수행하는데 있어서 비용과 시간을 단축시킬 수 있을 것이다.

참고문헌

- (1) Huh, K. S., Cho, B. H. and Choi, J. H., 1999, "Development of a Track Tension Monitoring System in Tracked Vehicles," Proceedings of the ASME IMECH
- (2) 허건수, 조병희, 서문석, 서일성, 박동창, 2000, "궤도차량의 직진주행시 궤도장력감지," 대한기계학회 논문집 A, 제 24 권 제 6 호, pp. 1608-1615.
- (3) 허건수, 홍대건, 서문석, 아춘호, 최필환, 2001, "궤도차량의 동적 궤도장력 조절시스템 개발," 대한기계학회 논문집 A, 제 25 권 제 10 호, pp. 1678-1683.
- (4) 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.
- (5) Oakley, R., Quinn, D. and Jones, R. D., 1994, "Track Tensioning Programme 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., 2000, "A Compliant Tank Link Model for High-Speed, High-Mobility Tracked Vehicle," International Journal for Numerical Methods in Engineering. Vol. 48, Issue: 10, pp. 1481-1502
- (7) Wong, J.Y., 1993, *Theory of Ground Vehicles*, 2nd ed., John Wiley & Sons.

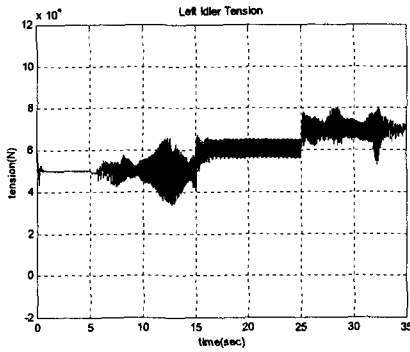


Fig. 9 Idler Tension in Simulation (a)

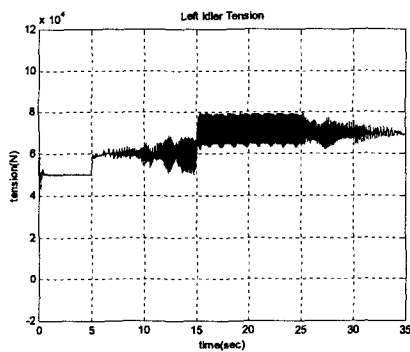


Fig. 10 Idler Tension in Simulation (b)

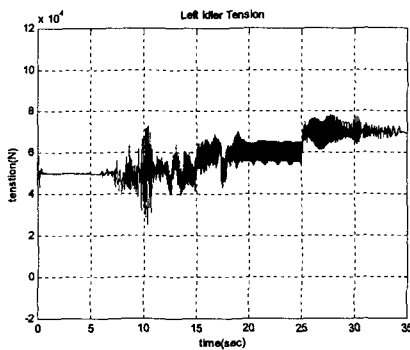


Fig. 11 Idler Tension in Simulation (c)

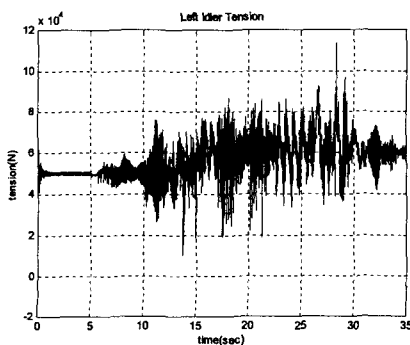


Fig. 12 Idler Tension in Simulation (d)