



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

가설 와이어 케이블의 일정 장력유지 제어



2010年 2月

釜慶大學校 産業大學院

電氣工學科

黃 英 九

工學碩士 學位論文

가설 와이어 케이블의 일정 장력유지 제어

指導教授 洪 淳 一

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함



2010 年 2月

釜慶大學校 産業大學院

電氣工學科

黃 英 九

黃英九의 工學碩士 學位論文을 認准함

2009 年 12 月

主審 工學博士 姜 大 夏 (印)

委員 工學博士 朴 瀚 錫 (印)

委員 工學博士 洪 淳 一 (印)



목 차

목차	i
표 목차	ii
그림 목차	iii
Abstract	iv
제 1 장 서 론	1
1.1 연구배경	1
1.2 목적 및 필요성	3
1.3 연구방법 및 내용	5
제 2 장 가설 와이어 케이블	7
2.1 와이어 케이블 가설 원리	7
2.2 가설 와이어의 운동 방정식	9
2.3 장력발생 서보전동기 모델	12
2.4 장력의 측정요소의 모델	17
제 3 장 장력제어 시스템의 구성	20

제 4 장 시뮬레이션과 실험	24
4.1 시뮬레이션	24
4.1.1 장력 발생전동기 특성	25
4.1.2 장력제어	28
4.2 와이어 동적모델	30
4.3 실험	35
 제 5 장 결론	 41
 참고문헌	 42



표 목차

표 2.1	토크 발생 ac 서보전동기 정수	12
표 2.2	측정조건	12
표 2.3	제어기 사양	16
표 4.1	시스템 파라미터	25



그림 목차

그림 2.1	현재 사용되고 있는 와이어 케이블 가설 공사	7
그림 2.2	케이블 가설 작업 모델의 개념도	8
그림 2.3	장력 시스템 케이블 흐름도	9
그림 2.4	케이블 모델	10
그림 2.5	토크제어 시스템의 이득특성	13
그림 2.6	토크제어 시스템의 위상특성	14
그림 2.7	스텝응답 (전압지령 - 전압출력)	15
그림 2.8	장력 검출원리	17
그림 2.9	장력 검출기	17
그림 2.10	계기용 증폭기 회로	19
그림 3.1	제안한 와이어 장력제어 시스템	23
그림 4.1	시뮬레이션 블록선도	24
그림 4.2	장력발생 전동기 실측 장력	26
그림 4.3	장력발생 전동기 시뮬레이션 장력특성	27
그림 4.4	장력발생 전동기에 의한 와이어 길이 응답	27
그림 4.5	차대 위치 고정 장력의 스텝응답 ($l = 1.2 \text{ m}$)	28
그림 4.6	장력발생 시스템 와이어 길이 스텝응답 ($l = 1.2 \text{ m}$)	29
그림 4.7	차대 위치고정 스텝 장력응답 ($l = 0.4 \text{ m}$)	29
그림 4.8	차대 위치고정 와이어 길이 스텝 응답 ($l = 0.4 \text{ m}$)	30
그림 4.9	집중정수 모델	31
그림 4.10	이동하는 집중정수 모델	31

그림 4.11	미소한 질점을 계속 출력하는 모델	32
그림 4.12	집중정수 모델의 경계조건	32
그림 4.13	와이어 좌표계	33
그림 4.14	$a = 5[m/s^2]$, $l = 1[m]$ 일 때 장력 시뮬레이션	35
그림 4.15	장력제어 실험장치 구성	36
그림 4.16	장력과 지령토크의 스텝응답	37
그림 4.17	와이어 중간에 충격을 준 장력응답	38
그림 4.18	PI제어에 의한 위치고정 장력응답	39
그림 4.19	PID제어에 의한 위치고정 장력응답	40
그림 4.20	와이어 이동 정지제어와 장력 PID제어에 의한 응답	40



Holding Control of a Constant Tension for a Stringing Wire Cable

Young -Ku Hwang

Department of Electrical Engineering

Graduate School of Industry

Pukyong National University

Abstract

Modeling and tension control of a stringing wire cable have been received a great deal of interest in industrial field. As a wire cable is stringed for a newly or exchanged working, it is necessary to hold a constant tension for stringing wire cable. For this necessity, the objective of this paper is developed tension control system for a stringing wire cable. The goal of the study is the establishment of a tension control system for mobile wire cable while maintaining fixed tension.

The works of a stringing wire cable causes disturbance and difficulty in the control process with numerous motions. The study of these projects starts with the control of location and tension in menu plates.

In this paper, tension control system is presented by feedback of the measured tension, based on equation of ac servomotor for generating torque and dynamic equation of a stringing wire cable. And also dynamic model of a stringing wire cable analysis numerically and is discussed by the simulation.

To design the controller, there are a need for modeling of a stringing wire cable, ac servomotor and control scheme. Accordingly a model of a tension system can be seen in the equation of ac servomotor for generating torque and dynamic equation for a stringing wire cable.

Based on this model, the simulation of tension control system discuss the response' characteristics of system and decides the parameters of the controller's elements. The proposed system's effectiveness was verified through simulations and tests.

제 1 장 서 론

1.1 연구배경

최근 Mechanism과 Electronics에 의한 Mechatronics 공학의 발달로 산업현장에서 기계의 제어를 전자화 함으로 기계성능의 고도화가 가능하게 되었다. 종래의 기계는 다수의 기구 및 구조부품으로 구성되어 있고 고성능이 요구되지 않았다. 또한 당시의 메카니즘은 두께가 크고 무겁고 구성이 복잡한 경향이였다. 그리고 기구나 구조부품에 의존하는 기계에서는 사양의 변경에 대하여 유연성이 없는 결점이 있었다.

이것에 대하여 메카트로닉스 기계시스템은 기계적으로 구성하기 쉽고 제어와 정보처리 부분을 분리하고 그 기능을 분해하여 센서, 정보처리부, 액츄에이터(actuator) 등으로 치환함으로써 제어성이나 사양에 대한 유연성이 있다. [1, 2]

메카트로닉스의 대표적인 응용은 로봇의 개발과 연구이다. 특히 산업체에서 인건비 절감과 생산품질의 향상, 품질의 균질성 등이 요구되고 있어 이러한 문제를 해결하기 위해 산업용 로봇이 현저히 발전되고 있다. 이러한 배경 아래 산업용 로봇은 용접, 도장, 운송, 조립 등 여러 분야에 응용되어 자동화 추진의 중요한 역할을 하고 있다. [3, 4]

전력선 가설공사에서 장력이란 전선을 당길 수 있는 힘을 말한다. 와이어 케이블을 가설할 경우 장력은 케이블을 당기는 힘과 케이블 자신의 무게에 의한 힘이 겹쳐지므로 장력은 지지점 부근에서 최대로 되며 지지점 사이의 중심위치에서 최소로 된다. [5, 6, 7] 일반적으로 앞의 것을 최대장력 뒤의 것을 수평장력이라고 하는데 실제문제로 취급할 때는 경간이 매우 길지 않을 경우 최대장력과 수평장력은 같은 것으로 취급해도 상관이 없다.

와이어 케이블을 두 지지점에 가설하는 경우 지지점에서 중간부분으로 갈수록 전선이 점점 처지게 되는데 이 전선이 아래로 처지는 포물 곡선의 정도를 이도(Dip)

라고 한다. 장력은 이도에 의해 결정되는 것으로써 이도를 크게 잡을수록 장력이 적게 되어 기계적으로는 안전하지만 필요이상으로 이도를 크게 하든가 적게 하면 사고의 원인이 되므로 이들의 조건을 만족시켜 주기 위해서는 케이블의 기계적 강도의 허용범위 내에 강하게 가설하는 것이 필요하다. 그래서 최고온도 또는 최저온도 시에도 만족할 수 있도록 가설해야 한다.

와이어 케이블은 어느 정도 장력에 비례하여 신장하고 또한 원상태로 복귀되는데 어느 한도를 넘도록 장력을 가하면 원상태로 돌아오지 않게 된다. 이 신장의 한도를 탄성한도(彈性限度)라고 하며 파괴장력의 대략 50~60%이다. [8, 9, 10]

표준장력은 파괴장력을 어떤 안전율로써 나눈 값을 말하며 일반적으로 경동선의 표준장력은 파괴장력에 대하여 안전율을 2.2이상 취하여 파괴장력의 45.4%이하로 하고 있으며 기타 와이어 케이블에 대해서는 안전율을 2.5이상 취하여 파괴장력의 40%이하로 하고 있다.

현재 와이어 케이블의 설치에 소정의 이도를 유지하도록 윈치를 운전하여 당기는 방법으로 한다. 이 경우 이도의 측정이 매우 중요하며 측정방법은 직접법과 간접법이 있으며 직접법은 등장법, 이장법, 수평 이동법, 각도법, 추출 각도법, 표적 관측법 등이 있다. [11, 12, 13]

간접법은 장력계법, 진동주기 측정법, 충격파 측정법이 있고 이중 장력계법이 많이 사용된다. 장력계법은 왜형기록 장력계와 스프링식 장력계가 있고 양쪽 모두 가설 케이블의 장력을 전기적으로 변화시켜 측정하든지 기계적 변위를 계기로 읽어 들여 지지점 장력을 측정하는 방법이다.

가공전차선의 가선방식은 가공 단선식으로 설치하도록 되어 있고 가공 단선식은 직접 조가방식, 카테나리 조가방식이 있다. 직접 조가방식은 조가선을 사용하지 않고 스패션 등에 전차선을 직접 지지하는 단순한 가선 방식이다. 이 방식은 건설비는 저렴하나 전차선 장력을 일정한도 이상으로 크게 하는 것이 기술상 곤란하기 때문에 고속운전 구간의 가선방식으로서는 부적당하며 일부 역구내 전기차 유치선

등 측선용 가선과 과거 시가 전차선 등에서 사용되었으며 전기차의 허용속도 45km/h이하로 제한되어 있다.

카테나리(현수곡선) 조가방식은 지지물로부터 애자에 의해 조가선을 조가 하여 카테나리 형상으로 가설되며 이 조가선에 일정한 간격마다 행거(Hanger) 또는 드로퍼(Dropper)로써 전차선을 조가 하여 행거 및 드로퍼의 길이를 적당히 조정함으로써 전차선을 레일면상 거의 일정한 높이로 가설하는 방식으로써 열차의 고속운전에 적합한 가선방식이다.

이상과 같이 측정한 이도가 규정한 값을 유지하도록 원치운전에 의한 가설 케이블을 설치하고 원치 조작은 유압식, 전자식, 공기압식이 있다. [13, 14, 15]

유압식 원동 장치의 입력전달순서는 연선 차 드럼(Drum)의 회전력을 증속기로 전달하여 증속기에 의해 유압펌프를 회전시켜서 유압 관로내 압력을 발생시킨 다음 연선 드럼에 회전저항을 주어 연선장력은 설정된 유압에 의해 정해지고 유압펌프에 의해 토출된 유압을 압력제어판으로 제어한다. 전자식 원동 장치는 건식 단판 전자 클러치/브레이크, 전자 Retarder 등으로 구성된 전기 원동기이다.

공기압 식 원동 장치는 연선 차 드럼의 회전력을 증속기에 전달하여 증속기에 의해 공기압축기에 회전을 주어 공기여과기를 통과시켜 흡입시킨 공기를 압축시킨 다음 압축공기의 방출량을 제어하여 압축기 부하의 중심에 따라 연선 차 드럼에 브레이크를 건다. 그리고 구동장치에 의한 제동은 공기를 흡입 압축해서 공기탱크에 축적하여 압축공기는 제어되고 일정압력이 보존되고 방향제어판을 조작해서 공기압이 실린더에 들어가고 피스톤을 작동시켜 핸들 브레이크를 조인다.

1.2 목적 및 필요성

본 연구는 위험한 장소의 작업에서 장력을 일정하게 제어하는 것은 인간을 열악한 작업환경에서 해방시키고 자동제어 이론을 적용하여 산업기계를 자동화 시키는 하나의 과제에서 출발한다. 본 연구를 하게 된 기본 목적은 전력케이블이나 와이어

로프 등의 장력을 제어하여 작업을 자동화함으로써 작업능률의 증가, 품질향상, 열악한 작업환경에서의 해방이다.

실제 산업현장에서 섬유의 방직, 종이의 제조, 플라스틱의 제조, 케이블의 가공, 강철선의 제조 등의 경우에는 장력 제어문제가 매우 중요하다.[16] 전력공급에 널리 사용되는 지중케이블이나 리 환로 케이블을 설치할 경우 절연파괴, 단선현상 때문에 이것의 인장에는 항상 일정한 장력이 요구된다.

단면적 $170[mm^2]$ 의 와이어 케이블 가설의 경우 간단하게 순수한 동선으로 생각하면 비중은 $8.93 \times 10^3[kg/m^3]$ 이기 때문에 선밀도는 $1.5[kg/m]$ 이다. 이것을 약 $1500[kgf]$ 장력을 걸어 가설하는 것이다. 이 때 와이어 길이 $10[m]$ 일 때 장력 중에 접하는 와이어 무게 성분은 1% ($15[kgf]$)이지만 길이가 $100[m]$ 에 도달하면 장력의 10%($150[kgf]$)를 접하게 된다. 이것은 와이어를 가설하여 감에 따라 와이어 무게에 의한 영향이 무시할 수 있는 상태에서 무시할 수 없는 상태로 천이하는 것을 의미한다. 제어기 편에서 보면 제어대상이 변하기 때문에 동작 초기에서 최후까지 목표로 한 동작을 하도록 할 필요가 있다.

현재, 한국은 물론 일본 등에서도 기존 설치된 전력 케이블의 보수작업은 수작업에 의해서 교환하는 일이 많다. 이상의 필요에 따라 장력제어 장치를 자동화하여 장력을 스스로 유지하고 설치하는 케이블의 자동 가설장치의 개발이 산업 현장에서 기대되고 있다.

전력 케이블 가설은 케이블이 가설된 후 전력이 도통할 때 발생하는 열 신축, 지진발생이나 일반적인 단락사고 발생시에 나타나는 기계적인 응력 등이 어느 정도 인가를 예측하여 케이블의 품종 선택이나 부설방법이 결정되어야 한다. 케이블 가설공사에서 가장 중요한 것은 케이블에 흐르는 부하전류의 변화, 주위환경 변화 등에 지탱할 수 있는 일정한 기계적 강도를 유지하여야 하고 이렇게 되기 위해서는 전력케이블의 장력제어가 매우 중요하고 필요하다.

현재 한국전력에서 시행하고 있는 송배전선로의 전력케이블 가설공사는 크레인

의하여 수동으로 하고 있으며 전력용 지중케이블 설치공사는 장력은 거의 무시하고 가설하는 실정이다.

1.3 연구방법 및 내용

장력제어에서 제어기를 구축하는 경우 제어대상의 성질을 알 필요가 있다. 또는 제어기 파라미터를 결정하고 적응제어나 학습에 의한 최적화를 행하는 경우 제어대상의 시뮬레이션 모델은 필요 불가결한 것이다.

일반적으로 본 연구에서 대상으로 하는 와이어는 수하 특성이 없는 것으로 가정하고 와이어를 당기는 경우 장력은 와이어의 자중(무게)에 의해 영향을 무시하여 외형에 의한 응력에 따른 변동도 고려한다. 가설되는 와이어 케이블의 모양을 결정하는 파라미터는 케이블이 드럼에서 풀려진 길이에 따라 변화하고 시변 파라미터가 존재한다. 그러므로 전차 트로이 선과 같이 와이어 자체가 무겁고 길게 가설하는 경우는 장력에 점하는 와이어 자중에 의한 영향을 무시할 수 없다.

와이어를 당기면서 이동할 때 실제 주어지는 힘에 의해 발생하는 진동은 와이어 자중을 고려하지 않으면 발생하지 않는다. 그리고 와이어는 계속하여 드럼에서 풀리기 때문에 길이가 동적으로 변하는 것을 고려할 필요가 있다.

와이어 케이블을 가설하거나 교체작업을 하는 경우 케이블을 당기는 장력의 세기는 일정치를 유지하도록 조절할 필요가 있다. 본 연구의 목적은 일정장력을 유지하는 와이어 케이블 가설 시스템의 개발이다.

본 연구는 가설되는 와이어 케이블의 모델, 장력발생 교류서보 전동기의 모델 및 와이어의 운동방정식을 구하고 이것에 기초하여 와이어 측정장력을 피드백 하는 일정장력 제어 시스템의 구성을 제시하였다. 제어기를 설계하기 위해서는 가설 와이어의 모델이 필요하고 모델과 제어기를 포함한 시뮬레이션은 제어기 파라미터를 조정하고 성능을 평가하기 위해서 사용된다. 따라서 실제로 작성한 구한 모델과 방정식에 기초하여 시뮬레이션 모델을 작성하여 시뮬레이션에 의해 제어 파라미터를

구하고 장력제어 성능을 검토하였다.

또한 가설되는 와이어 케이블 중량을 고려하고 길이가 동적으로 변화하는 상태를 표현할 수 있는 동적 모델에서 이론식을 구하여 수치적으로 해석한다.

그리고 도출한 이론을 검증하기 위해 제안한 장력제어 시스템은 시뮬레이션과 실험을 비교 검토하여 그 유효성이 검증되었다.



제 2 장 가설 와이어 케이블

2.1 와이어 케이블 가설 원리

그림 2.1은 현재 전차 트롤리션 크레인으로 당기면서 가설하는 작업 모델을 나타낸다. 이 경우 덩을 관측하여 일정장력이 걸리도록 수동으로 장력을 조절한다. 본 연구에서는 와이어 케이블 자동 가설장치를 개발하는 것이다.

그림 2.2는 와이어 케이블을 일정장력으로 당기면서 가설하는 작업 모델의 원리도이다. 기본 개념은 그림과 같이 케이블 한쪽 끝을 고정하고 다른 한쪽 끝을 차대가 이동하면서 일정 장력으로 당기는 것이다. 이 경우 케이블이 신장(늘어남)되거나 바람 등에 의해 케이블의 흔들림은 외란으로 작용한다. 또한 케이블을 당기는 장치를 탑재한 차대가 실제 이동할 때 지면의 요철, 지면의 마찰 등도 외란으로 작용한다.

케이블 가설은 케이블이 단선되지 않을 정도로 당겨야 하기 때문에 외란의 영향을 고려하여 제어할 필요가 있다.

정장력 제어시스템의 제어대상은 현수형 케이블 양단의 장력이고, 케이블은 차대의 주행에 따라 형상이 항상 변하기 때문에, 시(時)변수가 존재한다. 또한 비선형이 되기 때문에 제어는 외란에 강인성을 갖는 정장력 제어를 행해야 한다.

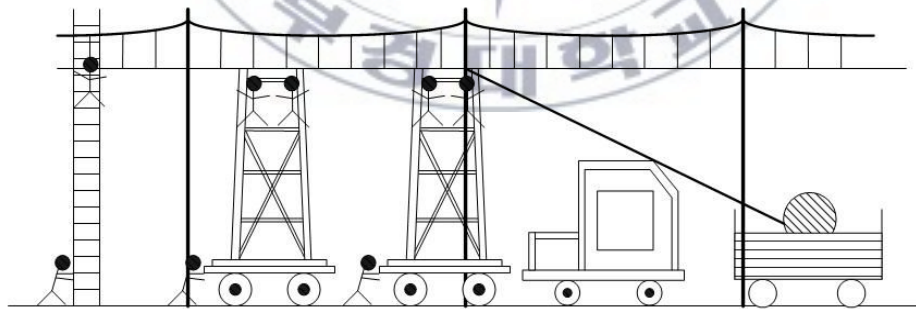


그림 2.1 현재 사용되고 있는 와이어 케이블 가설 공사

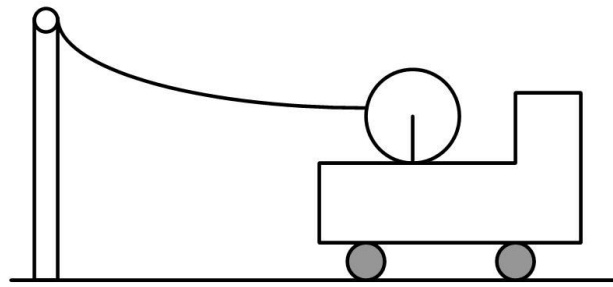


그림 2.2 케이블 가설 작업 모델의 개념도

케이블을 몇 회 구동륜에 감으면 마찰력이 감는 회수에 의해 지수함수 (exponential) 적으로 증가하기 때문에 케이블을 구동하는 데 충분한 마찰력이 얻어진다.

전동기가 직접 드럼을 움직이면 케이블이 풀릴 때 케이블의 종류에 따라 드럼의 관성 모우먼트 등이 달라지는 것을 방지할 수 있다.

그림 2.3은 장력제어 시스템의 구조와 케이블 흐름도를 나타내며 와이어를 감아둔 드럼(reel), 와이어를 유도하는 활차, 와이어에 장력을 주는 구동륜, 실제의 와이어 장력을 측정하기 위한 로드셀, 그리고 로드셀에 의해 와이어에 장력을 전하는 동활차 및 장력을 발생하는 AC 서보 전동기로 구성된다. 전동기 축은 직접 구동륜에 연결하면 파워가 부족하기 때문에 감속비 1:30의 홀 감속기를 통해 전동기에 직결하고 있다.

케이블은 미리 드럼에 감겨 있고 구동륜은 케이블을 활차에서 끌어 당겨 장력 구동장치의 역할을 한다. 제어대상은 전력선 양단의 장력이고 가설 거리에 따라 형상이 변한다. 드럼에서 풀린 와이어는 활차에 의해 방향을 바꾸고 구동륜에 감긴다. 와이어는 구동륜에 2회 감겨 고정활차에 대하여 각도를 가진다.

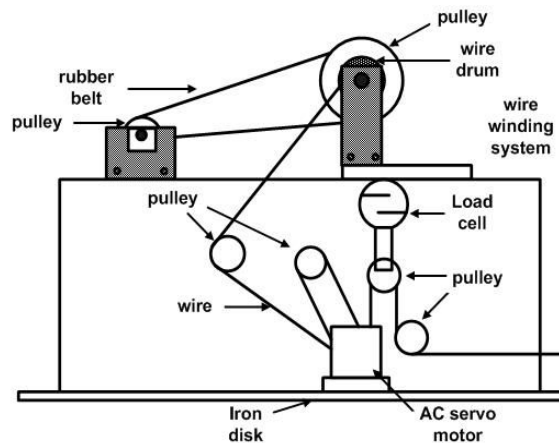


그림 2.3 장력 시스템 케이블 흐름도

Load cell의 브리지는 일정 인가전압이 걸려있고 여기에 장력이 가해지면 외형이 생겨 내부의 저항치가 변화하여 전압의 변화로 출력된다. 이 출력전압이 측정장력에 비례한다. Load cell의 출력전압은 $1[kgf]$ 당 $660[\mu V]$ 로 매우 작기 때문에 계기형 증폭기가 Load cell의 출력전압을 증폭하기 위해 사용된다. 이 계기형 증폭기는 장력 $0 \sim 10[kgf]$ 에 대하여 출력전압이 $0 \sim 10[V]$ 가 되도록 설계되어 있다.

2.2 가설 와이어의 운동 방정식

그림 2.4는 케이블 모델을 나타내고 장력은 고정 지지점에서 이동거리 Δl 보다 케이블의 길이 l 가 충분히 길 경우 와이어의 중량(자중)에 의한 현수선의 식에 의해 장력이 결정된다. 이 때 장력은 와이어의 중량에 따르기 때문에 상당히 작게 된다.

그러나 여기서 제어해야 할 와이어의 장력은 와이어가 거의 수평으로 당길 정도의 강한 장력이기 때문에 와이어의 중량에 의한 것 외에 와이어의 변형 즉, 와이어의 신축성이 중요한 문제로 된다. 와이어의 신축성은 포아손비 및 영률에 따르고

다음 식이 된다.

$$F = T_w / h^2 \quad (2.1)$$

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{F}{E} = \frac{1}{E} \cdot \frac{T_w}{h + \Delta h^2} \quad (2.2)$$

$$h^2 \cdot l = (h + \Delta h)^2 (l + \Delta l) \sigma = \frac{\Delta h / h}{\Delta l / l} \quad (2.3)$$

여기서,

F : 와이어 단위 면적당의 힘 T_w : 전체의 힘 (기서는 와이어 장력)

h : 와이어의 단면을 정방형으로 근사한 한 변의 길이

Δh : 힘에 의한 h 의 변화량 l : 와이어의 길이

Δl : 와이어 길이의 변화량 σ : 포아손 비



그림 2.4 케이블 모델

이상에서 장력은

$$T_w = \frac{\Delta l}{l} E (h + \Delta h)^2 \quad (2.4)$$

이 된다. 이때 포아손 비에 의해 $\Delta h(= \sqrt{\Delta S})$, Δl 가 변화하지만, $\Delta h \ll h$ 이므로 Δh 은 무시 할 수 있다. 따라서 장력 T_w 는

$$T_w = \frac{\Delta l}{l} E h^2 = \frac{\Delta l}{l} \cdot E S \quad (2.5)$$

로 구해진다.

장력계의 운동방정식은 와이어의 장력, 장력 발생 전동기의 토크, 와이어를 감아 둔 드럼의 동마찰 토크에 관한 식으로 된다. 또 장력계에는 외란 항이 식에 나타나지 않지만 실제 차대의 이동이라는 외란이 존재한다. 이 외란은 와이어의 장력 향에 포함되어 있으므로 이 식에서는 나타나지 않는다. 다음은 운동 방정식을 나타낸다.

$$J_2 \ddot{l} = - \left[\frac{T_M}{R_2} + T_D \right] + T_w \quad (2.6)$$

$$T_D = \begin{cases} 0 & \dot{l} < 0 \\ C & \dot{l} \geq 0 \end{cases} \quad (2.7)$$

여기서

J_2 : 장력발생 드럼의 관성 모우먼트 l : 와이어의 길이

T_M : 장력발생 전동기의 토크 R_2 : 장력 발생 드럼의 반경

T_D : 와이어를 감아 둔 드럼의 동마찰력.

T_w : 와이어의 장력 C : 동마찰 정수

2.3 장력발생 서보전동기 모델

표 2.1은 사용한 토크발생용 교류 서보전동기 정수이고 전동기 토크의 제어는 이미 제작되어 있는 제어기(MR-H20AN) 제품을 사용하기 때문에 제어기를 포함한 전동기 특성을 알아둘 필요가 있다.

표 2.1 토크 발생 ac 서보전동기 정수

정격전류	정격회전수	정격토크	관성모우먼트	정격출력
3.26[A]	3000[rpm]	6.5[kgf]	0.35[kgf-cm]	0.2[kW]

모델로 한 토크제어 교류 서보전동기는 지령치에 추종하여 출력을 얻을 수 있는 것으로 한다. 여기서 토크제어 서보시스템은 서보 전동기와 제어기를 포함한 전체를 하나의 블록으로 생각하여 전달함수를 결정한다. 표2.2의 측정 조건에서 주파수를 바꾸면서 시스템에 입력전압을 가하고 출력되는 전압의 진폭 및 위상을 오실로스코프로 측정하여 시스템의 동특성을 조사한다. 이 특성 측정결과 그림 2.5는 이득의 주파수특성을 나타내고 그림 2.6은 위상의 주파수특성을 나타낸다.

표 2.2 측정조건

입 력	정현파 입력 전압
	진폭 [V] : 1.0
	주파수 [Hz] : 0.1 ~ 500
부 하	구속 상태 (∞)
측정 장치	HIOKI 8825 Memory Hicorder

그림 2.5에서 graph.1은 위상특성을 고려하지 않고 이득 특성을 우선해서 그린 곡선이고 이 곡선에 근사한 전달함수는 식 (2.8)이다.

$$G_v(s) = 0.4e^{-0.002s} \frac{1 + \frac{1}{350}s}{1 + \frac{1}{100}s} \quad (2.8)$$

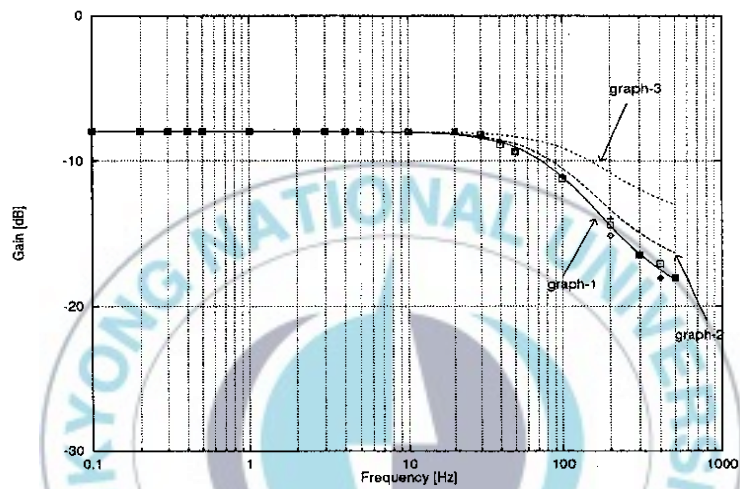


그림 2.5 토크제어 시스템의 이득특성

그림 2.5에서 graph.2는 이득특성과 위상특성 둘 다를 고려하여 측정한 것이며 이 곡선에 근사한 전달함수는 식(2.9)과 같이 구할 수 있다.

$$G_v(s) = 0.4e^{-0.002s} \frac{1 + \frac{1}{300}s}{1 + \frac{1}{100}s} \quad (2.9)$$

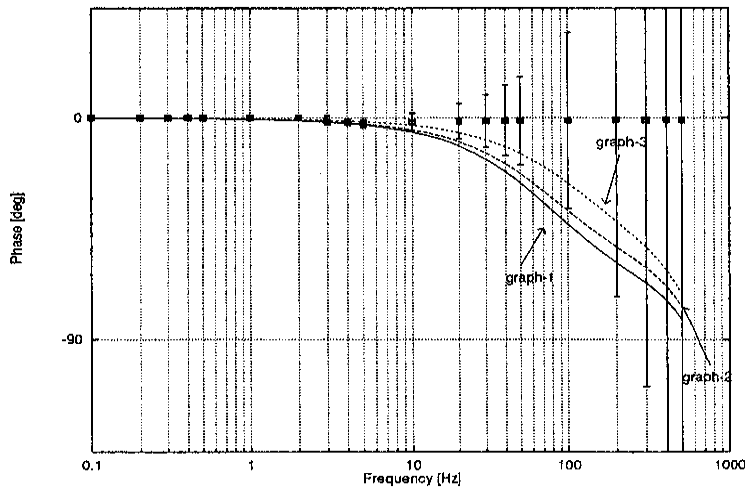


그림 2.6 토크제어 시스템의 위상특성

그림 2.6에서 graph.3은 이득특성을 고려하지 않고 위상특성을 우선하여 측정한 것이며 이 곡선에 근사한 전달함수는 식(2.10)과 같이 구할 수 있다.

$$G_v(s) = 0.4e^{-0.002s} \frac{1 + \frac{1}{300}s}{1 + \frac{1}{150}s} \quad (2.10)$$

또한, 전달함수 $G_v(s)$ 은 입력전압으로 지령전압 V_{ref} 에 대해 모니터 상에서 얻어지는 출력전압 V_{out} 로써 구한 것이다. 이득특성은 graph.1 이 그리고 위상특성은 graph.3에서 가장 좋은 근사식을 얻을 수 있다. 그리고 graph.3에서 이득특성은 큰

오차가 발생하여 전달함수를 구하는 것은 적절하지 않다. graph.2는 graph.3보다 큰 오차가 발생하지 않고 위상특성에 있어서도 graph.1보다 측정 데이터와 거의 일치하고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 고주파영역에서는 1[m/sec]의 시간오차에

상당하는 위상오차가 크며 예를 들어 100[Hz]에서 오차 36[deg]가 생긴다.

제어기 내부의 샘플링 주기가 1[m/sec] 것을 고려하면 graph.1과 graph.2에 나타난 정도는 차이가 있다고 말할 수 없다. 따라서 이득특성이 좋은 근사 전달함수를 얻을 수 있는 graph.1의 쪽이 적당하다고 판단되기 때문에 이것의 식을 전달함수로 결정한다. 이상과 같이 하여 결정된 전달함수 $G_v(s)$ 는 토크 지령치에 대한 출력 토크 전달함수 $G_t(s)$ 로 나타내면 다음 식이 된다.

$$G_t(s) = e^{-0.002s} \frac{1 + \frac{1}{350}s}{1 + \frac{1}{90}s} \quad (2.11)$$

그림2.7은 이상과 같이 결정한 전달함수 $G_t(s)$ 에서 Matalab를 사용하여 스텝응답을 조사한 결과를 나타낸다.

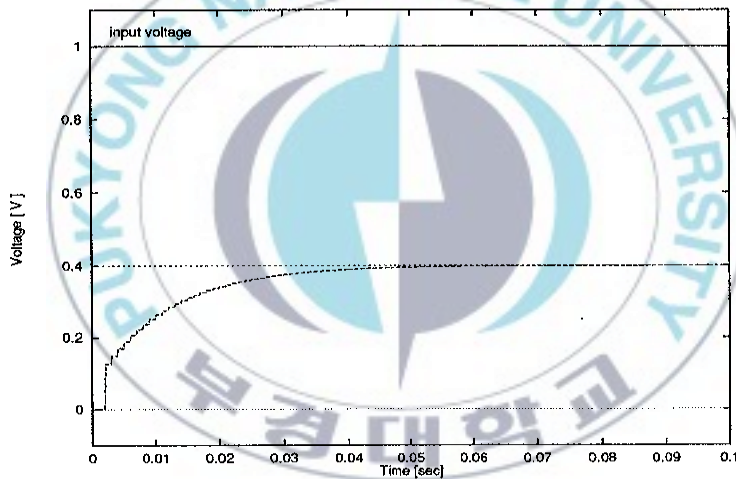


그림 2.7 스텝응답 (전압지령 - 전압출력)

표 2.3는 토크제어기 이고 이것은 자동 조정이 되기 때문에 지령치에 대하여 출력이 추종된다. 제어기 토크지령치에 대한 입력 전압지령치는 다음 관계가 있다.

$$V_{qref} = \frac{T_{qref}}{T_{qmax}} \cdot TLC \cdot V_{qmax} \quad (2.12)$$

여기서 T_{qmax} : AC 서보전동기 최대출력 토크 $19.5[kg \cdot cm]$, V_{qmax} :토크 제어기 최대 입출력 전압 $8.0[v]$, TLC : 지령토크 상한을 최대 출력토크 T_{qmax} 의 0~100%로 설정.

AC 서보 전동기 출력 토크 T_{qout} 의 검출치는 제어기 모니터 출력전압 V_{qout} 로 나타낼 때 출력 토크 T_{qout} 와 모니터 출력전압 V_{qout} 은 다음의 관계가 있다.

$$T_{qout} = \frac{V_{qout}}{V_{qmax}} \cdot T_{qmax} \quad (2.13)$$

결국 실험에서 V_{qout} 와 T_{qout} 은 선형적으로 비례하고 (2.13)에서 다음이 된다.

$$V_{qref} = C_1 \cdot T_{qref} \quad (2.14)$$

여기서 서보 전동기가 정회전일 때 C_1 은 $0.20[kgf]$ 이고 역회전 일 때 $0.30[kgf]$ 이다.

표 2.3 제어기 사양

구 분	Misbish MR-H20
전 원	3상 200~300[V]/50, 60[Hz]
제어방식	정현파 PWM 방식/전류제어방식
토크 지령입력[V]	DC 0 ~ ±8[V]
샘플링 시간	1.0[msec]

2.4 장력의 측정요소의 모델

와이어의 길이가 변화면 와이어의 모양이 변하기 때문에 응답에 크게 영향을 미치므로 운동 방정식으로 나타내는 것이 곤란하므로 측정 결과에서 제어를 행하는 경우 저역필터(Low pass filter)로 장력의 측정 결과를 필터링한다.

그림 2.8은 와이어의 장력을 검출하기 위한 장치도이고 2개의 고정 활차와 로드셀이 붙어있는 1개의 동활차로 구성되어 있다. 검출의 원리는 와이어를 동활차에서 180도 방향 변환을 하는 것에 의해 동활차에 걸리는 힘을 검출한다. 이 경우 실제 장력의 2배의 힘이 검출기에 걸리게 되고 장력을 검출하는 장치는 로드셀을 이용한다.

그림 2.9는 동활차에 붙인 로드셀과 로드셀에서 검출한 장력 신호를 증폭 하여 A/D변환하여 제어용 컴퓨터에 데이터를 전송하는 구조를 나타낸다. 로드셀은 와이어에 걸리는 힘의 변화에 따라 저항이 변화하는 도체를 이용하고 브리지형의 평행 회로를 구성한다. 브리지회로에 걸리는 힘은 출력 단에 전압으로 출력된다. 로드셀에 걸리는 힘과 출력 전위차의 관계는 $620[\mu V/kgf]$ 가 된다. (단, 기준전위를 V_b 는 $10.32[V]$ 로 한다.)

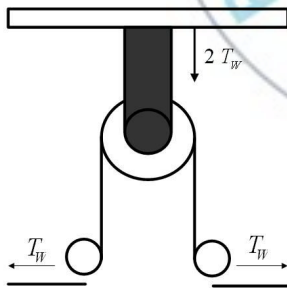


그림 2.8 장력 검출원리

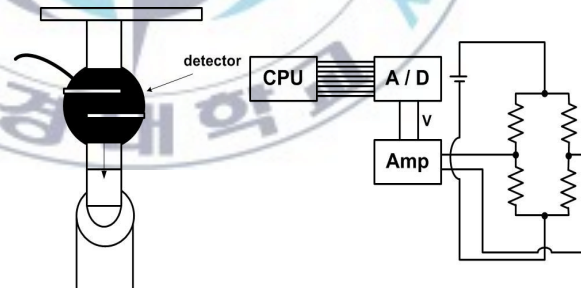


그림 2.9 장력 검출기

하중변환기에서 구하는 장력 T_f 는 검출되는 전압에 대해서 다음 식으로 나타난다.

$$T_f = \frac{C_l}{V_{li}} \cdot V_{lo} \quad (2.15)$$

V_{li} : 브리지 인가전압[V]

V_{lo} : 출력전압[V]

C_l : 교정정수 0.016656 [$kgf \cdot V/\mu V$]

이번 측정에서는 브리지 인가전압 $V_{li}=11.0[V]$ 로 행하였기 때문에 장력 T_f 는 식 (2.16)과 같이 구해진다.

$$T_f = C'_l \cdot V_{lo} \quad (2.16)$$

$$C'_l = 1.5141 \text{ [} kgf/\mu V \text{]}$$

하중변환기에서 출력되는 전압은 1[Kgf]당 약 660[μV]로 매우 미소하기 때문에 A/D 컨버터의 전단에 프리앰프를 접속하여 이 신호를 증폭한다. 제작한 프리앰프는 장력 T_f 가 0 ~ 20[Kgf]에 대하여 출력전압 V_o 가 약 0 ~ 10[V]에 대응하도록 증폭율을 가늠하여 아래와 같이 설계한다.

그림 2.10은 장력 측정용 계기증폭기(Instrumentation Amp)회로 결선도이고 로드 셀의 출력 전압은 상당히 작으므로 증폭할 필요가 있다.

증폭기 이득은 로드셀에 장력 20[kgf]을 측정할 수 있도록 하여야 하기 때문에 그 2배 40[kgf]까지 측정할 수 있도록 조정할 수 있게 한다. 증폭기는 1단에서 $G_1 = (130K/10K+1)$ 로 증폭하고 2단에서는 반전 차동 증폭기에 의해 2·130K배 증폭하는 것으로 하여 합계 $Gain = (130K/10K+1) \cdot 2 \cdot 130K = 386.7$ 의 증폭기를 구현한다.

프리앰프의 출력전압 V_{po} 와 장력과의 관계는 식(2.17)로 나타낸다.

(2.17)

$$C_p = 1.0094 \text{ [kgf/V]}$$

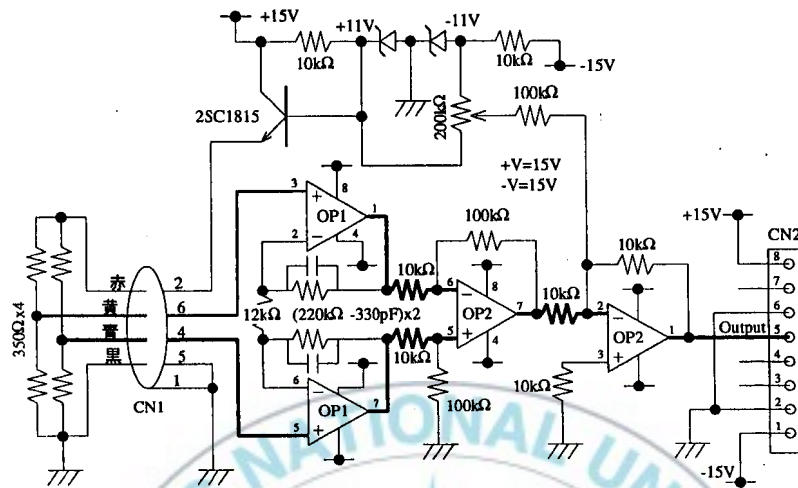


그림 2.10 계기용 증폭기 회로

제 3 장 장력제어 시스템의 구성

케이블 양단에 걸리는 장력은 케이블이 풀리면서 가설 될 때 시간에 따라 변한다. 가설 와이어 케이블 장력제어 원리는 미리 와이어 이동속도와 가속도를 이용하여 어느 정도의 케이블을 당길 것인가를 예측을 하고 AC 서보전동기의 토크 지령 신호를 입력하여 장력의 조절을 행한다. 장력제어 시스템 구성은 장력지령치와 실측한 장력의 피드백제어를 기본으로 하고 토크 발생용 AC 서보전동기로 장력을 제어한다.

와이어의 진행속도, 장력, AC 서보전동기의 출력토크, 및 전동기의 회전속도 사이에 에너지 보존법칙에 의해 아래의 관계가 성립한다.

$$T_W v_d = T_M \omega \quad (3.1)$$

여기서, v_d : 와이어 이동 속도 T_M : 장력발생 전동기의 토크
 T_W : 와이어의 장력 ω : 전동기 회전속도

또 치차 감속비와 구동 휠(driving wheel)의 반경 사이에 아래 관계가 성립한다.

$$\frac{T_M}{T_W R_2} = n_2 \quad (3.2)$$

여기서 n_2 (0.1): 치차 감속비

R_2 (0.02m) : 장력 발생 드럼의 반경

로드셀에서 측정되는 장력과 피드백 신호사이에 다음의 식이 성립한다.

$$T_W = k_s \delta x = k_s \frac{v_{fb}}{k_f} \quad (3.3)$$

여기서, $k_s(200[N/m])$ 는 스프링 정수, $k_f(200[A/m])$ 는 피드백 정수, δx 는 스프링 정수, v_{fb} 는 피드백 신호이다. 드럼에서 풀린 와이어 길이 l 는 다음이 된다.

$$l = \int_0^t v_{wir} dt \quad (3.4)$$

여기서 v_{wir} 는 와이어 케이블 풀림 속도이다. 서보 전동기와 부하의 운동방정식은 다음과 같다.

$$T_m(t) = J_2 \frac{d}{dt} \omega_m(t) + n_2 R_2 T_W(t) + n_2 R_2 k_f \omega_m(t) \quad (3.5)$$

여기서 $J_2 (3.5 \times 10^{-5} [kgm^2])$ 는 서보 전동기 축으로 환산한 합성 관성 모우먼트이다. 장력계의 운동방정식은 와이어의 장력, 와이어의 장력전동기의 토크, 와이어를 감아 둔력, 와이어동마찰 토크에 관한 식으로 된다. 또 장력계에서 외란은 와이어의 이동이라는 외란이 존재하며 와이어의 장력에 포함되어 있는 것으로 한다.

와이어 운동방정식은 탄성한계 내에서 당길 때 발생하는 외형응력은 훅 법칙에서 (3.6)이다.

$$T_W = \frac{\Delta l}{l} \cdot ES = \frac{x-l}{l} \cdot ES \quad (3.6)$$

여기서 x : 고정점에서 와이어 이동거리 l : 와이어 풀린 길이
 E : 와이어 영율 S : 와이어 단면적

와이어의 실제의 길이가 1[m]일 때 신장을 포함하여 와이어의 실장은 1[m] + 1[mm]로 하면 장력은 식 (3.7)이 되어 1[mm] 변화에 대하여도 크게 변함을 알 수 있다.

$$T_W = \frac{x-l}{l}ES = \frac{1.001-1.000}{1.000} \times 1.4 \times 10^3 = 1.4kgf \quad (3.7)$$

$$ES = 1.4 \times 10^3 [kgf]$$

따라서 와이어의 신장을 고려한 Δl 은 케이블이 풀린 길이의 차이므로 (3.8)가 성립한다.

$$T_W = ES \cdot \frac{\int_0^t (v_d - v_{wir}) dt}{\int_0^t v_{wir}} \quad (3.8)$$

여기서 v_d , v_{wir} 는 각각 와이어 이동속도, 와이어 풀리는 속도이다.

$$J_2 \ddot{l} = - \left[\frac{T_M}{R_2} + T_D \right] + T_W \quad (3.9)$$

$$T_D = \begin{cases} 0 & i < 0 \\ C & i \geq 0 \end{cases} \quad (3.10)$$

여기서 T_D : 와이어를 감아둔 드럼의 동마찰력, C : 동마찰 정수이다.

그림 3.1은 제안한 장력 제어시스템의 블록선도를 나타낸다. 이 시스템은 제 2장에서 구한 각 구성요소의 모델 식과 장력계는 와이어의 운동방정식 (3.9), (3.10),

장력 측정은 로드셀을 이용하여 행하고 이 로드셀은 금속의 변형에 의해 장력을 측정하고 있다. 그리고 장력을 측정하기 위해 로드셀에 동활차를 연결하고 장력의 변화에 의해 동활차의 위치가 이동한다. 동활차가 이동하면 당연히 와이어의 길이가 변화한다. 이때 와이어의 모양이 변하기 때문에 응답에 크게 영향을 미치므로 운동 방정식으로 나타내는 것이 곤란하므로 측정 결과에서 제어를 행하는 경우 저역필터(Low pass filter)로 장력의 측정 결과를 통하게 한다.

– 23 –

는 실제로 측정한 것과 응답이 오버슈트 없는 조건에서 속응성과 정상 특성이 좋은 것을 사용했다. 표 4.1은 시뮬레이션에 사용한 시스템 파라미터이다.

표 4.1 시스템 파라미터

ρ	0.17	b	1/90
g	$9.8[m/s^2]$	K_p	3.0
a	1/350	T_i	1.0
출발장력	$30[N]$	T_D	2.0
K_1	$2/8*30$	J_1	$2.21[Kg \cdot m^2]$
K_f (포워드 상수)	0.5	R	0.075
K_{wire}	$1.4e+3[N/m]$	T_{wd}	1.0
c_a	0.001	f_1	10
c_b	1.0	f_2	10

4.1.1 장력 발생전동기 특성

장력제어 시스템을 설계하기 위해서 먼저 AC 서보전동기와 제어기의 특성을 알아야 한다. 여기서는 이 특성을 장력제어 시스템 설계에 반영하기 위해 장력 제어기에 스텝지령을 입력하여 그 응답을 측정한다.

그림 4.2는 장력 발생 전동기에 스텝 지령전압을 입력한 경우 장력응답을 측정한 그래프이고 장력 지령전압 (실선), 일점 세선 (실측 장력), 세선 (지령장력)을 나타낸다. 여기서 비레이득은 $K=5$ 이고 시정수 $T=0.21[sec]$ 이었다.

그림 4.3은 장력 지령전압을 $0[kgf]$ 에서 $2[kgf]$ 의 스텝으로 입력할 때 장력 응답의 시뮬레이션 결과이다. 응답 그래프는 장력 지령전압 (실선), 일점 세선 (실측 장력), 세선 (저역 여파기 통과 후 장력)을 나타낸다. 그림 4.4는 장력발생 전동기 스텝 지

령전압에 대한 와이어 길이 시뮬레이션 결과이고 실선 (와이어 길이) 와 와이어 고정점에서 이동위치를 나타낸다.

이상 장력 시스템의 개루프 특성 결과 장력발생전동기 지령전압과 검출 장력의 직류 이득은 $5.0[kgf/V]$, 시정수는 약 $0.21[sec]$, 부동작 시간 $15[ms]$ 가 되는 것을 알 수 있다. 이 값에 기초하여 PID 직렬보상기의 파라미터는 오버슈트가 발생하지 않도록 하여 $K_P = 1.6$, $T_i = 0.21$, $T_D = 0.0075$ 이었다. 그리고 장력시스템은 장력이 작은 경우 큰 오버슈트가 발생하는 비선형적이므로 비례 이득을 낮게 적분 시정수를 작게 하여 이득과 위상여유를 높게 해야 함을 알 수 있다. 최종 적으로 시뮬레이션을 하여 최적 파라미터는 $K_P = 0.25$, $T_i = 0.1$, $T_D = 0.03$ 이었다.

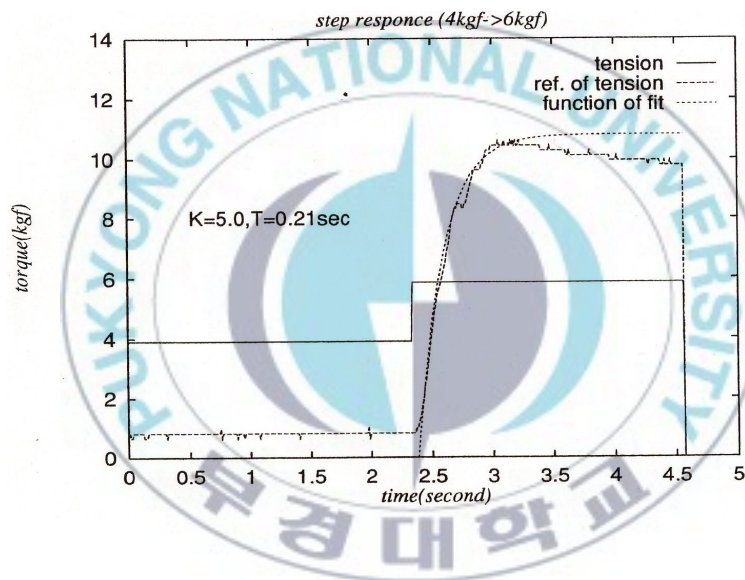


그림 4.2 장력발생 전동기 실측 장력

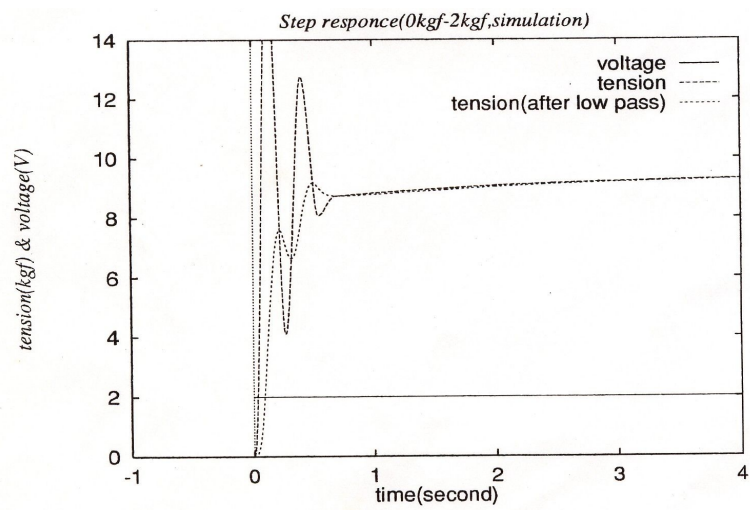


그림 4.3 장력발생 전동기 시뮬레이션 장력특성

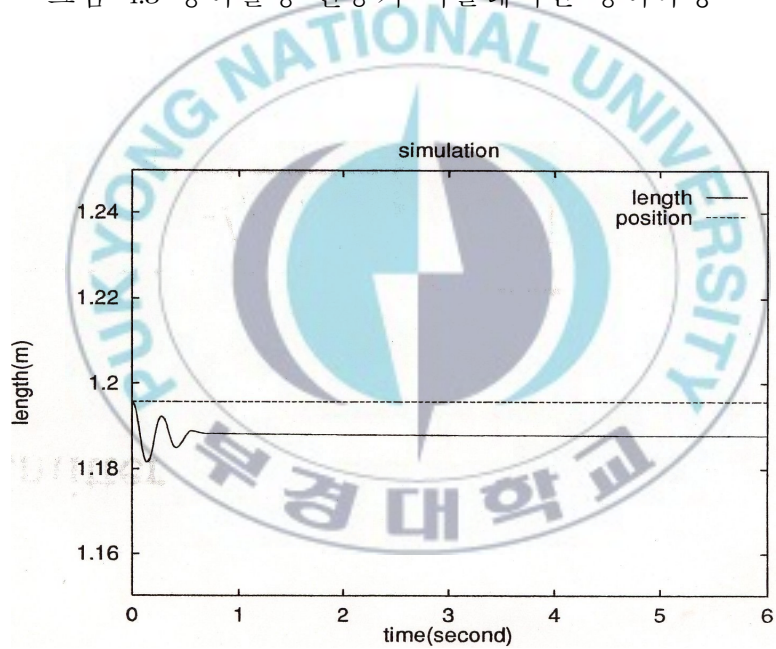


그림 4.4 장력발생 전동기에 의한 와이어 길이 응답

4.1.2 장력제어

장력응답은 $\tau=0.4[\text{sec}]$ 의 저역통과 필터를 통한 값이다. 제어 파라미터는 와이어 길이 $l=1.2[\text{m}]$ 의 일 때 기준으로 시뮬레이션에 의해 결정했다. 여기서 PID제어의 경우 $K_p=0.25$, $T_I=0.1$, $T_D=0.03$ 이고 PI제어의 경우 $K_p=0.25$, $T_I=0.3$ 이다.

그림 4.5 ~그림 4.8은 장력계를 단독으로 동작시킨 경우 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 장력응답의 그래프는 위에서부터 장력지령치, 전동기 토크 제어장치에서의 출력전압 값, 로드셀을 통과한 후의 검출 토크이다. 와이어의 길이에 관한 그래프는 위에서부터 실제의 길이, 와이어의 원래의 길이를 나타낸다. 목표장력은 특별히 기술하지 않는 한 $6[\text{kgf}]$ 이다.

그림 4.5와 그림 4.6은 케이블의 길이 $l=1.2[\text{m}]$ 일 때의 응답이고 그림 4.7과 그림 4.8은 케이블이 짧은 $l=0.4[\text{m}]$ 때의 응답이다. 와이어 길이 $l=1.2[\text{m}]$ 의 경우에 파라미터를 결정하기 때문에 와이어 길이 $l=0.4[\text{m}]$ 의 경우 응답이 진동적이다. 이 결과 시스템응답은 장력발생 전동기에서 얻어진 것과 같이 예상한 바와 되로 얻어졌고 양호하게 설계되었음을 확인하였다.

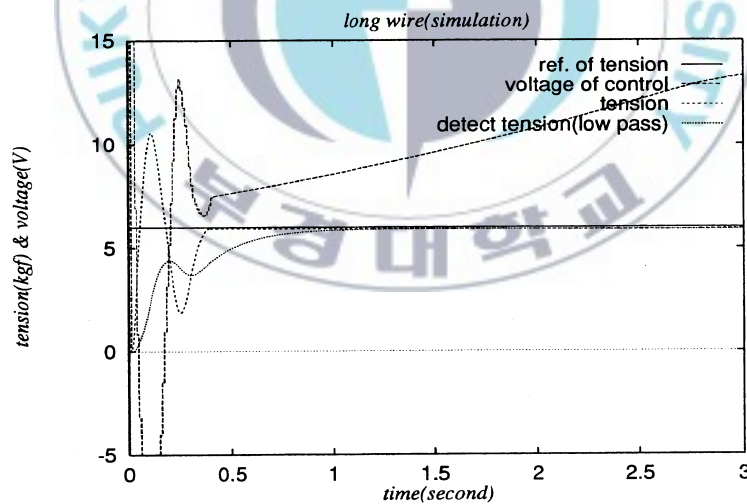


그림 4.5 차대 위치 고정 장력의 스텝응답 ($l=1.2[\text{m}]$)

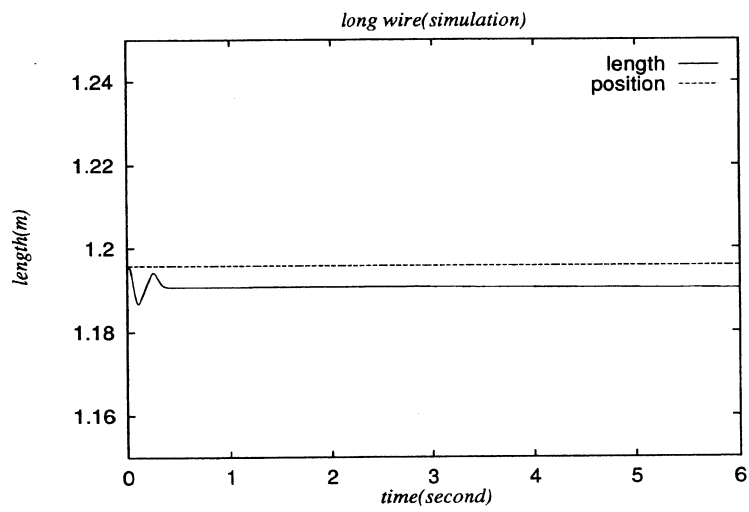


그림4.6 장력발생 시스템 와이어 길이 스텝응답 ($l=1.2[m]$)

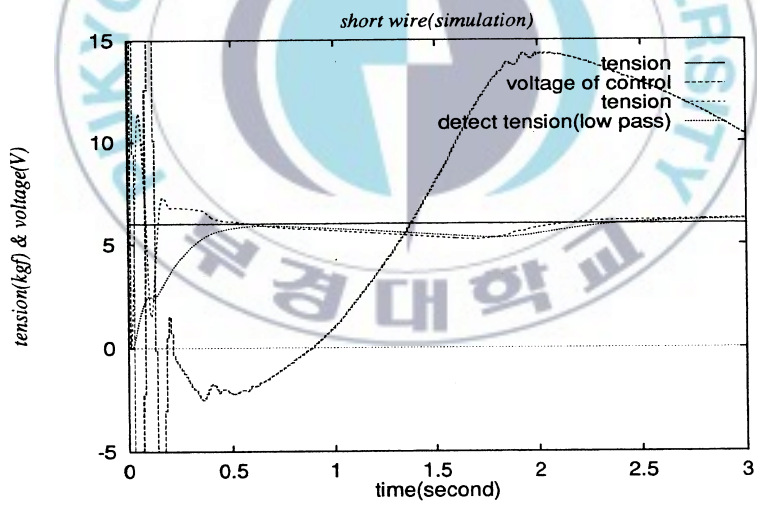


그림4.7 차대 위치고정 스텝 장력응답 ($l=0.4[m]$)

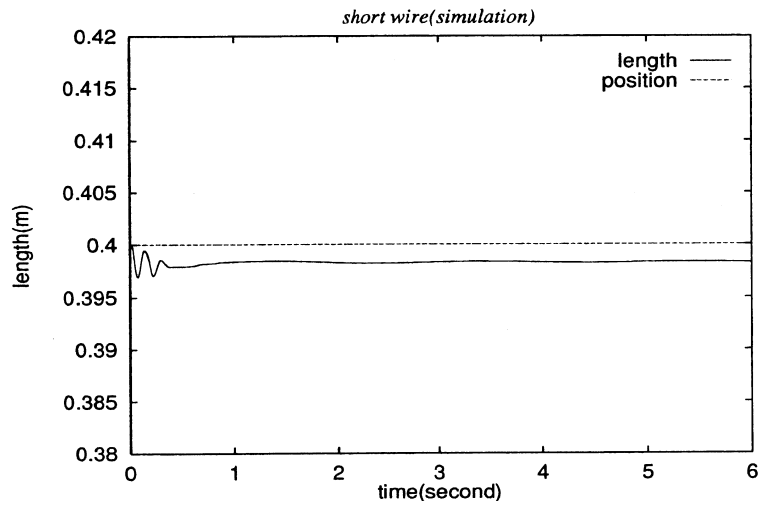


그림 4.8 차대 위치고정 와이어 길이 스텝 응답 ($l=0.4[m]$)

4.2 와이어 동적모델

와이어 모델은 외형 응력을 나타낼 때 와이어 무게를 모두 고려하지 아니하였다. 이 때문에 와이어에 발생하는 고유진동이 표현되지 않는다. 그림 4.9는 여러 개의 질점으로 되어 있는 탄성체에서 탄성체의 질량을 고려한 와이어의 집중정수 모델을 나타낸다. 그림 4.10은 와이어가 계속해서 풀림에 따라 이동하는 집중정수 모델을 나타내고 이 경우 질점의 질량이 와이어 길이에 변화를 주지 않을 수 없다. 여기서 와이어가 계속 풀리는 현상을 고려하여 실제 생기는 질점의 운동을 생각하여야 한다. 이것은 운동량 보존의 법칙을 이용하여 식을 세워 동적모델을 구한다. 이 경우 질점 위치가 움직이기 때문에 질점이 이동되어 실제 얻어지는 힘의 발생을 고려하지 않으면 안 된다.

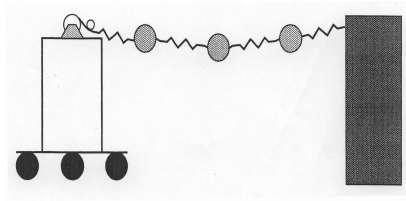


그림 4.9 집중정수 모델

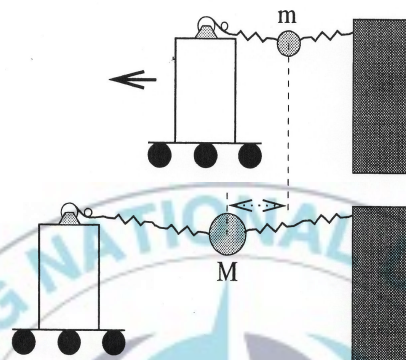


그림 4.10 이동하는 집중정수 모델

그림 4.11은 이상 언급한 이동하는 문제를 고려하여 그림 4.10에 나타낸 이동 상태에 있는 미소한 집중정수 계를 다수 연결된 연속정수계로 근사 시킨 모델을 나타내었다. 이것은 질점과 스프링이 일체로 된 계가 새로이 반복 출력됨에 따라 와이어 길이와 중량이 변하고 있는 것을 알 수 있다. 이 때문에 질점의 수가 초기에 고정되어 있는 모델에 비하여 반복 출력되는 질점이 이동하고 있는 것으로 생각한다.

이러한 이유에서 그림 4.12는 이 집중 정수계가 반복 출력될 때 경계조건을 명시적으로 나타낸 것이고 특히 새로운 요소가 부가될 때 성립하는 조건이 잘 나타나 있다.

그림 4.12의 집중정수 모델 경계조건에서 운동방정식은 (5.1)이다.

$$T_{n-1} + T_n - mg + ma = 0 \quad (4.1)$$

단, a :가속도, g : 중력가속도, T_n : n 점의 장력.

여기서 하나 하나는 집중정수 모델을 취급하였기 때문에 와이어를 연속체로 취급한 모델로 생각한다. 또한 중요한 가정으로써 와이어는 수평방향의 종진동과 수직방향의 횡진동만 하는 것으로 가정하고 횡요동등은 무시한다.

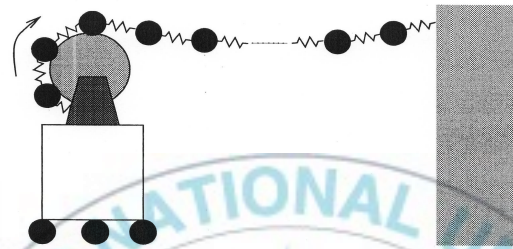


그림 4.11 미소한 질점을 계속 출력하는 모델

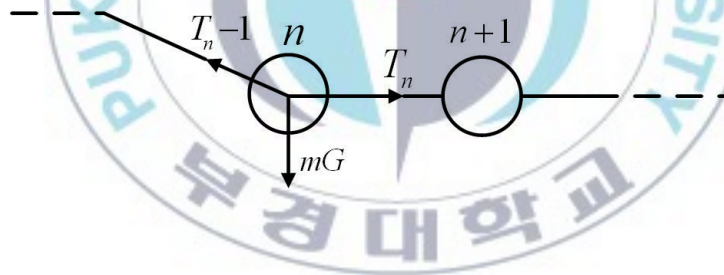


그림 4.12 집중정수 모델의 경계조건

그림 4.13은 가설 중인 와이어의 좌표계를 나타낸다. 여기서 s 는 장력 '0' 인 와이어 상의 한쪽 끝에서 측정한 길이를 나타내고 $u(s,t)$ 는 s 와 동일한 점에서 신축을 포함한 와이어 실제길이를 나타낸다.

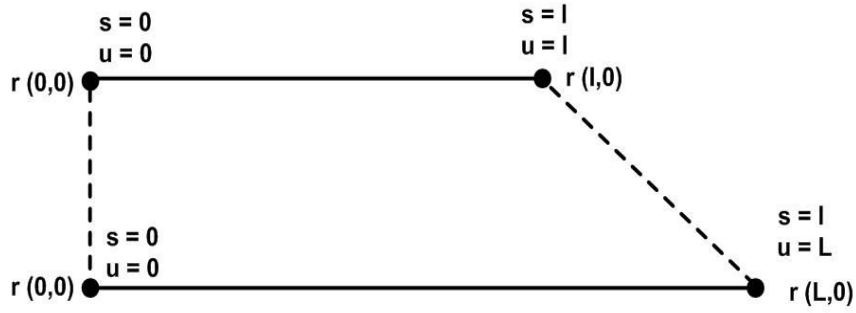


그림 4.13 와이어 좌표계

K 은 탄성정수라 하며 비틀림에 의한 응력 $T(s,t)$ 는 (4.2)이다.

$$T(s) = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} K \frac{u(s + \Delta s) - u(s) - \Delta s}{\Delta s} = K \left(\frac{\partial u}{\partial s} - 1 \right) \quad (4.2)$$

또한 실제 길이(자연장)에 대한 변위 $p(s) = u - s$ 은 도입하면 그 미분은 (4.3)이다.

$$\frac{\partial p}{\partial s} = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} K \frac{u(s + \Delta s) - u(s) - [(s + \Delta s) - s]}{\Delta s} = \frac{\partial u}{\partial s} - 1 \quad (4.3)$$

(4.3)을 (4.2)에 대입하면 (4.4)이다.

$$T(s) = K \frac{\partial p}{\partial s} \quad (4.4)$$

여기서 $r(s,t)$ 은 정지좌표계에 있는 와이어 상의 점 벡터로 정의하면 $\frac{\partial u}{\partial s}$ 는 단위 길이당 와이어 신축점에서 $|\frac{\partial r}{\partial s}|$ 와 동일 하게 된다. 즉, $\frac{\partial r}{\partial u} = \frac{\partial r}{\partial s} \frac{\partial s}{\partial u}$ 는 벡터의 단위s

당 늘어난 비를 스칼라의 단위 s 당 늘어난 u 로 나눈 것이 된다. 따라서 와이어의 운동 방정식은 (4.5)과 같이 된다.

$$\frac{\partial^2 r}{\partial t^2} = \frac{K}{\rho} \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{\partial p}{\partial s} \frac{\partial r}{\partial u} \right) + g + \frac{F}{\rho} - \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial r}{\partial t} \quad (4.5)$$

단, ρ 는 선밀도, F 는 와이어에 가해지는 중력과 장력을 포함한 단위길이 당 외력, μ 는 마찰 계수이다. 여기서 $\partial r / \partial t$ 는 로봇 주행속도이다. 이상 유도한 와이어 동적모델에서 장력의 수치계산은 와이어 이동속도와 와이어 풀림 속도에서 알 수 있다.

와이어 운동방정식 (4.2)에 경계조건을 대입하여 계산하지만 r 은 동일한 s 은 종속변수로 갖는 u 로써 미분하여 직감적으로 알 수 있는 계산이기 때문에 이것을 r 와 s 만의 표현으로 변환한다.

단위길이당 와이어가 늘어난 점에서 $\frac{\partial u}{\partial s} = \left| \frac{\partial r}{\partial s} \right|$ 이므로 $\frac{\partial p}{\partial s} = \frac{\partial u}{\partial s} - 1 = \left| \frac{\partial r}{\partial s} \right| - 1$ 이다. 또한, $\frac{\partial r}{\partial s} = \frac{\partial r}{\partial s} \frac{\partial s}{\partial u}$ 이므로 $\frac{\partial u}{\partial s} = \left| \frac{\partial r}{\partial s} \right|$ 에서 $\frac{\partial r}{\partial u} = \frac{\partial r}{\partial s} \cdot \frac{1}{\left| \frac{\partial r}{\partial s} \right|} = \frac{\frac{\partial r}{\partial s}}{\left| \frac{\partial r}{\partial s} \right|}$ 이 된다. 그러므로 (4.6)가 성립한다.

$$\frac{\partial^2 r}{\partial t^2} = \frac{K}{\rho} \frac{\partial}{\partial s} \left[\left(\left| \frac{\partial r}{\partial s} \right| - 1 \right) \frac{\frac{\partial r}{\partial s}}{\left| \frac{\partial r}{\partial s} \right|} \right] + g + \frac{F}{\rho} - \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial r}{\partial t} \quad (4.6)$$

여기서, $\partial r / \partial t$ 는 와이어 이동속도(v_d)에 해당하고 $\partial r / \partial s$ 는 와이어 풀림속도(v_{wir})에 해당한다.

그림 4.14는 와이어 길이 1[m]에서 풀리기 시작한 경우 로봇의 주행결과와 그때 속도 측정결과에서 연산한 장력 및 시뮬레이션 장력을 나타낸다. 그림에서 주목할 것은 와이어 이동이 가감속을 할 때 실측 장력에 비하여 시뮬레이션 장력이 크게

되고 있고 장력의 진동도 실측이 크게 나타나고 있다. 시뮬레이션 장력과 실측장력에 큰 차이가 있고 큰 진동이 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 이 때문에 로봇이 가속할 때 외에 당길 때 생기는 진동은 와이어 풀림과 로봇 주행 이외에 다른 요인이 있다고 생각된다.

또 시뮬레이션 값이 이동 종료 후에 완전히 일치하지 않는다. 이것은 수 $[m]$ 의 와이어에 대하여 비틀림 (회)응력이 수 $[mm]$ 의 편차에서 결정되기 때문에 계속해서 풀리는 길이나 이동거리를 0.1%의 편차로 대단한 정도로 측정되지 않으면 안 되지만 이것은 실재는 불가능하게 된다. 현재 사용한 와이어의 탄성정수는 $1[m]$ 일 때 $1.0 \times 10^4 [N/m]$ 이므로 거리측정 결과가 $1[mm]$ 달라지면 비틀림 응력이 $10[N]$ 이 된다. 특히 이동거리는 다이아의 슬립 등이 있으면 치명적인 측정결과 오차가 나타난다.

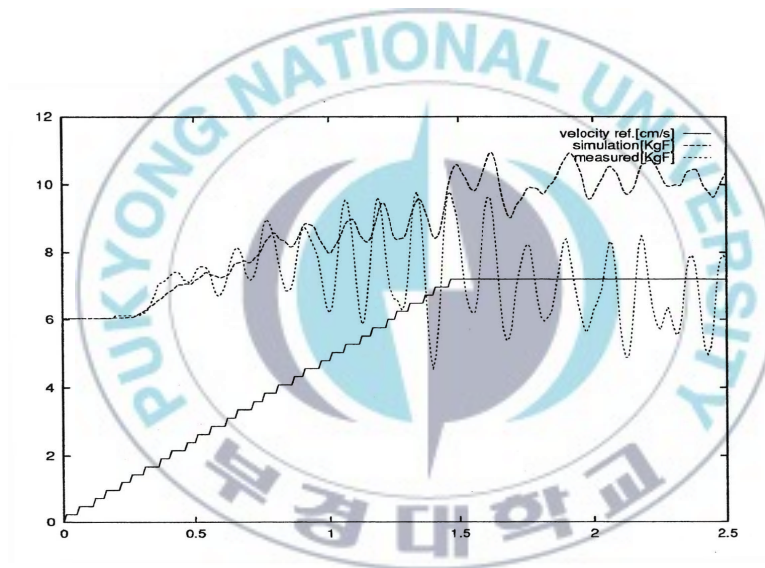


그림 4.14 $a = 5[m/s^2]$, $l = 1[m]$ 일 때 장력 시뮬레이션

4.3 실험

그림 4.15는 장력계의 기본적인 성질을 측정하기 위하여 개루프 상태에서 토크 지령치를 계단상으로 하는 계단응답의 실험장치 이다. 이 경우 와이어가 너선 하

지 않도록 미리 토크를 걸어 놓은 상태에서 더 큰 계단상의 토크 지령전압을 걸게 된다.

PC 에서 DAC를 통해 AC 서보제어기에 토크지령을 입력하고 장력검출기 출력을 증폭하여 디지털 오실로 스코프에 모니터링 한다.

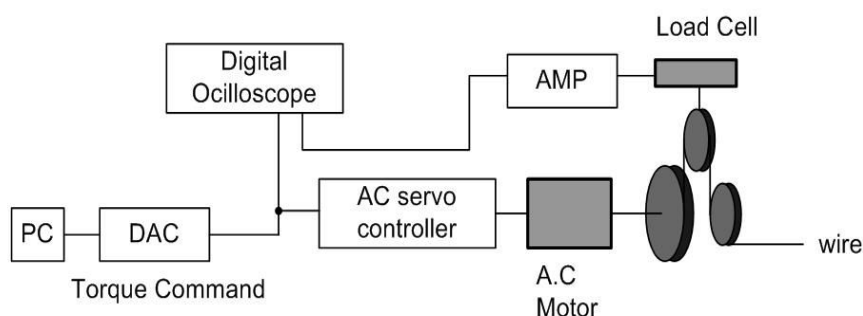


그림 4.15 장력제어 실험장치 구성

그림 4.16은 계단응답 실험결과이고 아래가 토크 지령전압이고 위가 토크 출력이 다. 장력의 스텝응답을 측정한 결과는 오버슈트가 발생하고 있다. 개루프에 관계없이 장력응답에 오버슈트가 있는 것은 AC 서보제어기 내부에 토크제어를 위한 피드백 루프를 갖고 있기 때문이다. 여기서 주목할 점은 토크 지령이 계단입력 전압을 넣어서 토크가 장력의 변화로 되어 전송되고 있기 때문에 와이어나 장력측정 장치 모두를 조합한 상태는 어느 부분에서 오버슈트가 발생하는 것인지 단정할 수 없다.

그림 4.17은 가설되고 있는 와이어의 중간에 충격외란을 준 경우 장력 응답을 나타내고 충격을 준 후 심한 진동을 나타내고 있는 것을 볼 수 있다. 지령장력 $6[Kgf]$ 에서 $1[m]$ 길이에 늘어난 와이어 중간에 충격을 주어 진동을 준다. 정상적인 방법은 아니지만 응답의 경향을 보면서 행한다. 그 결과 외란 응답이 진동적이기 때문에 정상상태에 진동이 수렴하여도 편차가 생기고 있는 것을 알 수 있다.

장력외란은 이동계에서 간섭을 외란으로 취급하고 있기 때문에 외란응답 특성이

나빠지는 경우 제어결과가 나빠지게 된다. 외란특성을 개선하기 위해서는 이득을 증가하는 방법이 있지만 발진하기 때문에 이득을 증가 할 수 없다. 시뮬레이션에 의한 외란 특성의 비교는 부록에 있다.

결국 이 실험에서 장력제어 시스템은 차량 이동 및 출발 전후, 와이어 흔들림 등 외란에 대하여 장력응답은 오버슈트와 진동이 발생함을 알 수 있다.

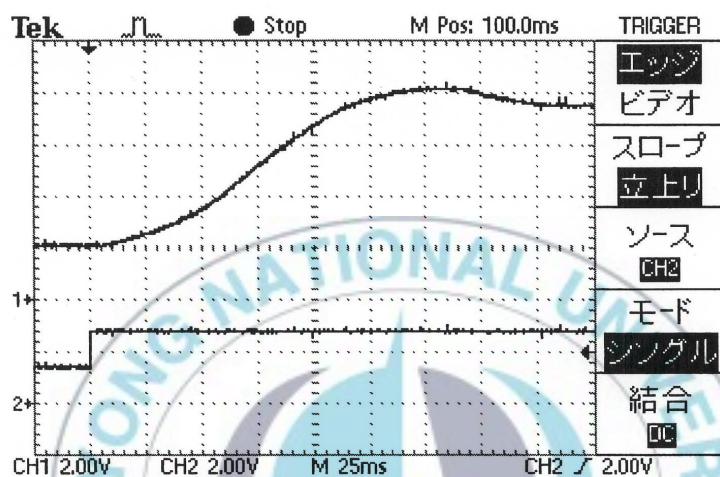


그림 4.16 장력과 지령토크의 스텝응답

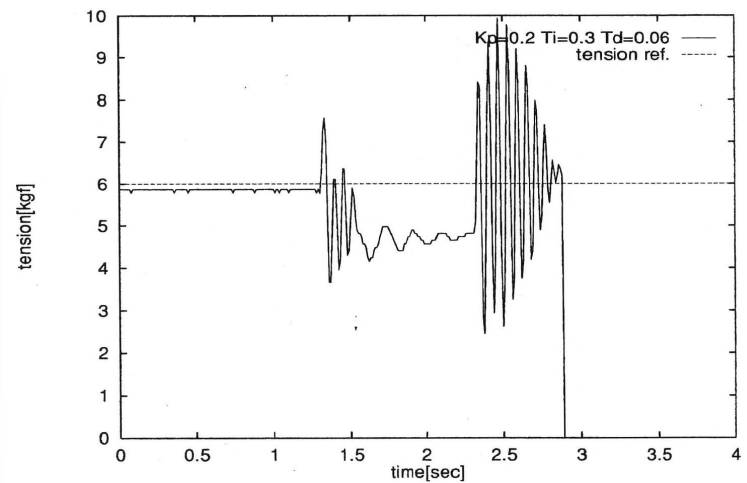


그림 4.17 와이어 중간에 충격을 준 장력응답

시뮬레이션에 의해 각 제어계의 파라미터 및 피드포워드 량도 결정했기 때문에 그 값을 이용해서 실제 시스템을 구성하여 실험을 행한다. 장력제어 시스템은 시뮬레이션과 거의 일치한 동작을 하도록 구성하였기 때문에 실제의 동작을 보면 시뮬레이션의 정확성을 판단할 수 있다. 실험은 시뮬레이션으로 한 것과 같은 동작의 특성을 볼 수 있도록 한다.

그림 4.18은 장력 지령치를 2[Kgf]에서 6[Kgf]으로 스텝지령을 주고 장력제어기는 PI 제어하여 응답을 측정한 것이다. 그림 4.19는 장력 지령치를 2[Kgf]에서 6[Kgf]으로 스텝지령을 주고 장력제어기는 PID 제어하여 응답을 측정한 것이다. 그 래프는 장력(실선) 제어기 입력전압(긴 일점세선) 및 토크 지령치(작은 일점 세선)를 각각 나타낸다. 이 경우 와이어를 당기기 시작할 때 진동이 발생하고 PI 제어는 PID제어 보다 장력 오버슈트와 잔류편차가 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 앞에서 나타낸 시뮬레이션 결과와 일치하고 있으며 제안한 장력제어 시스템은 유용함을 증명해 준다.

그림 4.20은 장력과 위치를 동시에 제어해 두고 위치에 대해서는 이동하지 않는 것처럼 제어한 것이다. 즉 장력이 단계적으로 조금씩 나누어 증가하고 있기 때문에 와이어는 이동하지 않는다. 그 때문에 속도는 계속하여 영을 유지한다. 최후의 위치를 고정하지 않는 것에 대해서는 이동 속도가 가해지고 있는 것을 나타낸다. 이 결과는 와이어 이동속도가 가해지면 장력응답은 지령치에 추종할 수 없는 것을 볼 수 있고 이 이동에 대한 외란은 피드포워드에 의한 보상이 필요함을 알 수 있다.

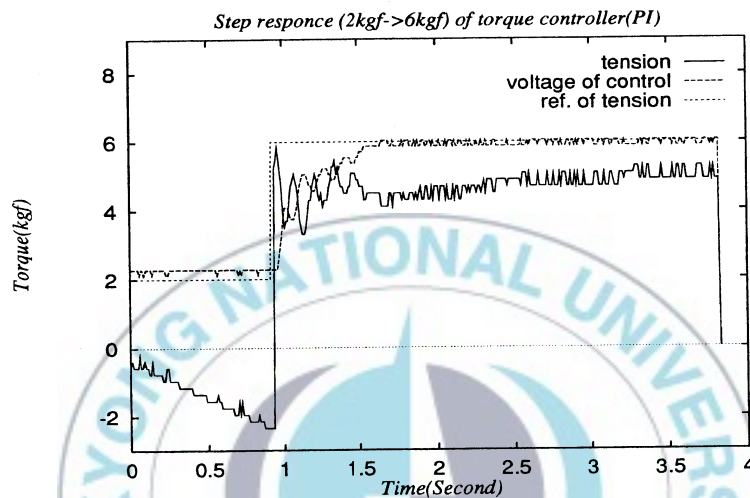


그림 4.18 PI제어에 의한 위치고정 장력응답

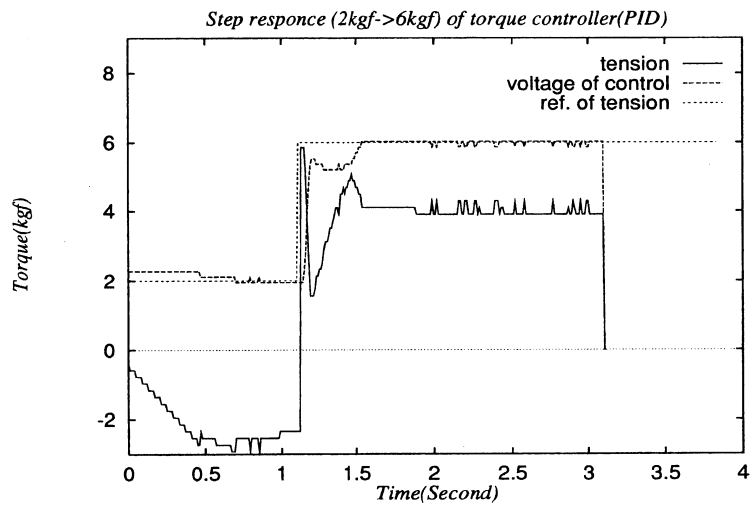


그림 4.19 PID제어에 의한 위치고정 장력응답

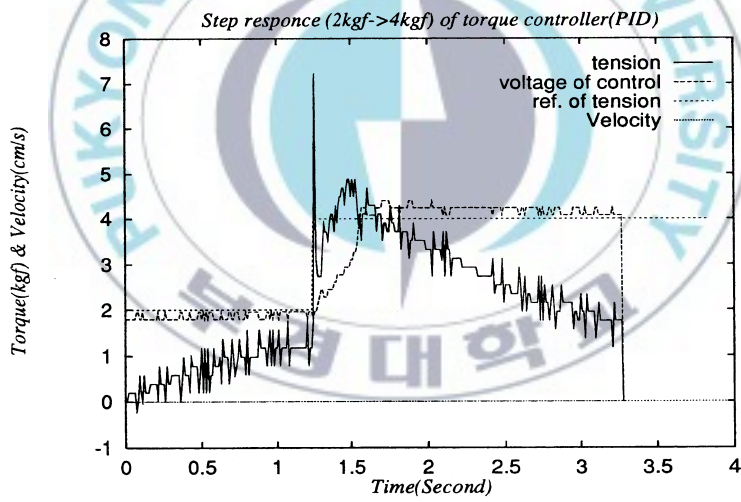


그림 4.20 와이어 이동 정지제어와 장력 PID제어에 의한 응답

제 5 장 결 론

본 연구는 가설되는 와이어 케이블의 모델, 장력발생 교류서보 전동기의 모델 및 와이어의 운동방정식을 구하고 이것에 기초하여 와이어 측정장력을 피드백 하는 일정장력 제어 시스템의 구성을 제시하였다. 제어기를 설계하기 위해서는 제어대상의 모델이 필요하고 모델과 제어기를 포함한 시뮬레이션은 제어기 파라미터를 조정하고 성능을 평가하기 위해서 사용된다. 따라서 실제로 작성한 모델과 방정식에 기초하여 시뮬레이션 모델을 작성함으로써 시뮬레이션에 의해 제어 파라미터를 구하고 장력제어 성능을 검토하였다.

또한 가설되는 와이어 케이블 중량을 고려하고 길이가 동적으로 변화하는 상태를 표현할 수 있는 동적 모델에 의한 이론식을 구하여 수치적으로 해석하였다.

그리고 도출한 이론을 검증하기 위해 제안한 장력제어 시스템은 시뮬레이션과 실험을 비교 검토하여 그 유효성이 검증되었다.

이번의 연구에 있어서는 기계계의 구조가 완전하지 않기 때문에 시뮬레이션의 결과와 실험 결과가 일치하지 않는 부분이 존재하였으므로 추후 시스템을 더욱 보완할 필요가 있다.

참고문헌

- [1] 古賀邦彦, “張力制御のための 張力計測装置の 試作”, 平成 7年 卒業論文
- [2] 中傑, “加線長りのための 張力制御に いての 研究”, 平成 7年 卒業論文
- [3] 村上慶一, “30年も 電車線”, JR East R&D Symposium, pp. 176-186, 1993
- [4] 翊田芳朗, “狭い 視野における 作業性能お 評價するための 遠隔制御 作業ロボ
ト の製作
- [5] 梅埜利彰, “オブザーバ お 用いた 誘導モータの 速度 センサレスベクトル 制
御に 關 する 研究”, 平成 6年 卒業論文
- [6] 日本 機械學會編, “メカトロニクスト制御工学 (CAIシリーズ)”, 日本 機械學會
- [7] M.H.Raibert and J.J.Craig, “Hybrid position/force control of manipulators”,
Transaction of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and
Control, vol.102, pp.126-133, 1981.
- [8] Toshio Fukuda, Takanori Shibata, Masatosi Tokita, Toyokazu Mitsuoka,
“Neuromorphic Control: Adaptation and Learning, ”IEEE Transaction on
Industrial Electronics, VOL.39,NO.6,pp.497-503, 1992.
- [9] 竹内俱佳, “永井豊,” 自律移動ロボットの ファジィ 誘導制御“, 日本ファジィ 學會
誌, Vol.2, No.1, pp.85-94, 1990
- [10] 遠藤耕喜, 竹内俱佳, “制御工学講義”, 昭光堂
- [11] 前田啓, 杉江俊治, “システム制御情報學會編、 アドバンスト 制御のための シ
ステム制御理論 ”, 朝倉書店
- [12] Di Xiao, Bijoy K. Ghosh, Ning Xi, and T. J. Tarn, “Sensor-Based Hybrid
Position/Force Control of a Robot Manipulator in an Uncalibrated
Environment.” IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 8,
No. 4, pp. 635-645, July 2000.

- [13] Luigi Villani, Ciro Natale, Bruno Siciliano and Carlos Canudas de Wit, "An Experimental Study of Adaptive Force/Position Control Algorithms for an Industrial Robot," IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 8, No. 5, pp. 777-786, September 2000.
- [14] Randolph Cabell, Dan Palumbo, and Jeffrey Viperman "A Principal Component Feedforward Algorithm for Active Noise Control: Flight Test Results," IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 9, No. 1, pp. 76-83, January 2001.
- [15] Mehrzad Namvar and Farhad Aghili, Member, IEEE "Adaptive Force-Motion Control of Coordinated Robots Interacting With Geometrically Unknown Environments," IEEE Transactions on Robotics, Vol. 21. No. 4, pp 678-694, August 2005.
- [16] Hakan Koc, Dominique Knittel, Michel de Mathelin, and Gabriel Abba, "Modeling and Robust Control of Winding Systems for Elastic Webs," IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 10, No.2, pp. 197-208, March 2002.

감사의 글

어느덧 짧지 않은 대학원 생활을 마무리하며 지난 시간들을 돌이켜보니 많은 아쉬움과 후회가 남습니다. 제가 이렇게 성장하기까지 오랜 시간이 걸렸지만 그 세월 속에서 직·간접적으로 힘이 되고 방향을 잡아주셨던 많은 분들께 감사의 말씀을 전하고자 합니다.

제게 있어 학위 과정의 길은 학문의 길보다는 인격 수양의 길에 더 가깝지 않았나 싶습니다. 모든 과정을 마치고 논문의 마지막을 글로 남기려 하니 베풀지 못하고 받기만 한 삶을 반성하게 됩니다.

참으로 부족한 저를 오늘의 제가 있게 해주신 지도교수 홍순일 교수님의 은혜에 고개 숙여 감사드리며, 석사 생활 내내 교수님께서 보여주신 관심과 배려 특히 2년의 석사 과정동안 끝임 없이 도전 할 수 있는 자극과 가르침을 주셨던 부분들 잊지 않고 영원히 마음속에 간직하고 살겠습니다.

또한 초라한 논문을 맡아서 열과 성의로 심사해 주신 강대하 교수님, 박한석 교수님의 세심한 배려 덕에 비로서 논문으로서의 틀을 갖추게 되어 대단히 감사하게 생각합니다.

언제나 묵묵히 저를 지켜봐 주시던 김실근 팀장님에게도 고개숙여 감사 드리며 이제는 유일한 나의 동기 배종우형에게도 깊은 감사의 말과 함께 전기 기술분야의 최고 1인자가 되기를 기원합니다.

2년 동안 항상 저의 곁에서 실험 및 논문준비를 도와주신 조교 정승환군, 곽은정 조교선생님 에게도 무한한 감사의 인사를 올립니다.

특히 항상 업무와 실험에 지친 저를 위로하고 도와준 아내 최은주와 무언의 격려를 보내주신 아버님, 어머님, 장인, 장모님께 이 논문을 바칩니다.

그리고 눈에 넣어도 아프지 않을 우리 아들 동현이 항상 건강하게 자라길 기원합니다.

2010年 1月

황 영 구