



공학석사 학위논문

수소연료전지차용 고성능 압력용기 제작을 위한 섬유 장력 시스템에 관한 연구

A Study on the Fiber Tension System for High Performance Pressure Vessel of Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicle

지도교수 김윤해

한국해양대학교 해사산업대학원

2019년 8월

기계시스템공학과 강 영 길

본 논문을 강영길의 공학석사 학위논문으로 인준함

- 위원장 : 김 준 영 (인)
- 위 원 : 김 윤 해 (인) 위 원 : 배성열 (인)

2019년 06월 28일

한국해양대학교 해사산업대학원

목 차

え	ļ

List of	Tables	iv
List of	Figures	V
Abstra	ct	vii
1. 서	론	
1.1	연구 배경	1
1.2 -	필라멘트 와인딩 공법	3
]	1.2.1 필라멘트 와인딩 성형방법 및 장치	3
]	1.2.2 와인딩의 종류 및 장력 장치의 방식	5
]	1.2.3 External Roving 장력 제어기의 장력 검출부 구조	8
1.3 3	필라멘트 와인딩 장력 제어 연구 동향	10
1.4	연구 목표	11

2. 장력 제어 시스템 구성

2.1 적응제어를 위한 장력기의 구성	··· 12
2.2 Full Closed PID 서보 제어기의 구성 ······	··· 14
2.3 Adaptive PID Servo Control	··· 15
2.4 Adaptive PID 서보 제어를 위한 Spool 직경 측정방법	••• 18

3. 실험 방법

3.1	장력	제어	시스템	실험장치	 20
3.2	실험	조건	및 방법	•••••	 25

4. 실험 결과

4.1	와이어 속도에 따른 장력 제어 특성의 변화	27
4.2	가속도의 변화에 따른 제어 특성의 변화	29
4.3	설정 장력에 따른 제어 응답의 변화	31

4.4 제어 게인에 따른 제어 특성의 변화	33
4.5 Spool Size에 따른 모터 제어 신호의 변화	35
4.6 Spool Size에 따른 제어 특성 ·····	37
4.7 Spool Size에 따른 최적 게인의 변화	39
4.8 실시간 Spool 크기 측정 실험	41
5. 결론	• 43
감사의 글	44
참고문헌	45

List of Tables

Table	1	Specification	of parts …	•••••	••••••	 22
Table	2	Experimental	parameters	and	conditions	 25
Table	3	Experimental	parameters	and	conditions	 40

List of Figures

Fig.	1	Filament Winding Machine System	4
Fig.	2 \	Various products made by filament winding technology	5
Fig.	3]	nternal and external roving type	7
Fig.	4]	Friction tension device for internal roving fiber	7
Fig.	5	Tension measurement by using 3 rollers	8
Fig.	6 I	Example of tension measurement by using 3 rollers	9
Fig.	7 1	Example of tension measurement by using sensing rollers	9
Fig.	8 3	Structure of tension system with adaptive control capability	12
Fig.	9 7	Trajectory of fiber from spool	13
Fig.	10	Fully Closed Feedback Control System Diagram	14
Fig.	11	Adaptive PID Servo Control	15
Fig.	12	Adaptive PID control scheme	17
Fig.	13	Change of proportional $gain(K_p)$ for adaptive control	17
Fig.	14	In-process wire spool diameter measurement	18
Fig.	15	Experimental setup	21
Fig.	16	Detailed view of Encoder block & tension mechanism	21
Fig.	17	Block Diagram of Servo Controller	23
Fig.	18	Experimental result of wire speed 1 m/s	28
Fig.	19	Experimental result of wire speed 3 m/s	28
Fig.	20	Experimental result of wire acceleration time $Ta = 0.4 \ s$	30
Fig.	21	Experimental result of wire acceleration time $Ta = 0.1 \ s$	30
Fig.	22	Experimental result of wire tension $T = 2kgf$	32
Fig.	23	Experimental result of wire tension $T = 4kgf$	32
Fig.	24	Experimental result of proportional gain K_p = 50	34
Fig.	25	Experimental result of wire proportional gain K_p = 200	34

Fig. 26 Experimental result of wire spool size $D = 85mm$
Fig. 27 Experimental result of wire spool size $D = 200 mm$
Fig. 28 Failure of control during deceleration due to system variable
saturation 38
Fig. 29 Successful control of high acceleration condition with small spool
size 38
Fig. 30 Stable proportional gain vs spool diameter
Fig. 31 Experimental result of spool diameter measurement 42

수소연료전지차용 고성능 압력용기 제작을 위한 섬유 장력 시스템에 관한 연구

강영길

기계시스템공학과

한국해양대학교 해사산업대학원

초록

최근 친환경 에너지인 수소, 천연가스 등을 자동차 연료로 활용하는 사례 가 증가하고 있다. 미국, 독일, 일본 등에서 많이 발전되었고 우리나라 또 한 수소연료전지차의 보급이 활발히 이루어지고 있다. 수소연료전지 차량에 탑재되는 수소 저장 압력 용기의 재료로서 탄소섬유강화 복합재료가 주로 적용되며, 필라멘트 와인딩 공법이 제작에 활용된다. 필라멘트 와인딩은 복 합재료의 공정법 중 하나로 회전하는 멘드릴 표면에 수지가 함침된 유리섬 유 혹은 탄소섬유 연속섬유를 설계된 각도로 감고, 경화로에서 설계온도 사 이클을 적용하여 경화시키는 방법이다. 필라멘트 와인딩 공정은 수작업 방식 인 핸드레이업 공정과 비교하여 생산 속도가 빠르고, 품질이 우수한 장점이 있 다. 하지만, 고속 와인딩 과정에서 섬유의 장력이 큰 폭으로 변화하게 되어 생 산성과 품질에 큰 영향을 주기 때문에 장력 제어 관련 연구가 활발히 진행 중에 있다. 본 연구에서는 필라멘트 와인딩의 일정한 장력을 위한 장력 제어 시스 템의 개발을 진행하였다. 로드셀-센싱바 방식의 장력 제어장치를 제작하고 기존 방식과 비교하여 성능의 향상을 확인하였다. 텐션암(Tension arm)이 장착되어 장력값이 급변하지 않도록 유지하고 센싱 암(Sensing arm)이 로드셀(Load cell)에 힘을 전달하며 와이어의 장력을 측정할 수 있게 하였다. 서보 제어기는 PID 컨트롤을 활용하여 구성되었고 PID의 게인을 적절 히 조절하는 적응제어 방법을 도입하였다.

와인딩 속도와 가속도, 장력, 제어 게인의 변화에 따른 장력 제어 특성과 스풀(Spool) 크기에 따른 모터 제어, 제어 특성, 최적 게인의 변화와 그리 고 실시간으로 Spool 직경 측정으로 성능을 확인하였다. 와이어 속도가 빨 라짐에 따라 기계적 편차에 기인하는 진동이 관측되고 가속도가 높아짐에 따라 장력이 순간적으로 올라가는 오버슈트를 확인하였다. 그리고 설정 장 력이 높아질수록 와이어의 장력 값이 안정되는 것을 보았고 제어 게인이 낮 으면 진폭이 커져 추종 특성이 좋지 않게 되고 지나치게 높으면 시스템이 발진하게 되어 적절한 게인 설정이 필요함을 확인하였다. 스풀 직경 증가에 따라 관성부하가 커지게 되어 제어기의 출력 진폭이 증가되며, 스풀 직경이 감소에 따라 응답 특성이 우수하게 됨을 확인 할수 있었다. 본연구를 통해 스풀 직경 크기에 따른 최적화된 제어 게인 값을 도출하였고, 필라멘트 와 인딩 공정에서의 스풀 직경에 따른 제어 게인 적용을 통해 장력 제어장치의 최적화가 이루어졌다.

KEY WORDS: Fiber reinforced composite 섬유 강화 복합재료; Pressure Vessel 압 력용기; Filament winding 필라멘트 와인딩; Tension Control 장력 제어;

A Study on the Fiber Tension System for High Performance Pressure Vessel of Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicle

Kang Young-Kil

Department of Mechanical system Engineering

Graduate School of Maritime Industries of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

In recent years, there have been increasing cases of using hydrogen as an environment-friendly energy and natural gas as vehicle fuel. It has been developed in USA, Germany and Japan, and Korea is also actively supplying hydrogen fuel cell vehicles. The hydrogen storage pressure vessel mounted on the hydrogen fuel cell vehicle is composed of a carbon fiber composite material. These pressure vessels are manufactured by the filament winding method. Filament winding is one of the processes of composite materials, in which glass fibers or carbon fibers composed of continuous fibers are impregnated with a resin on the surface of a rotating mandrel and wound, and the filament wound product is cured in a curing furnace for a predetermined temperature cycle.

Compared to manual hand laying process, automatic filament winding has the advantage of making products with higher tension with short production time. However, when filament winding speed increases, the uneven fiber speed profile creates fiber tension fluctuation widely.

- ix -

It is one of the major factors causing low productivity of winding process, hence several researches have been actively carried out to keep it constant. In this study, we have developed a tension control system to stabilize the tension in filament winding. A load cell sensing bar type tension measuring device is fabricated and the performance improvement is confirmed by comparing with the existing method. A tension arm is installed to absorb sudden fluctuation of fiber tension, and a sensing arm transmits the fiber tension to a load cell to measure it accurately. The servo controller is constructed using PID control and introduces an adaptive control method that adjusts the gain of PID appropriately.

Tension control characteristics according to winding speed. acceleration, tension and control gain, motor control, according to spool size, control characteristics, change of optimum gain and spool diameter measurement in real time are confirmed. As the wire speed increased, the vibration due to the mechanical deviation is observed, and an overshoot of tension value is observed as acceleration became higher. It is also found that wire tension value becomes more stable as wire tension value is increased. Low control gain shows poor tracking response with large errors. Properly tuned system with large spool size shows more control output amplitude as the inertial load is larger compared to a small sized spool. Small size spool shows excellent tracking response with minimum tracking error.

By using in-process spool size measurement and automatic gain tuning control scheme, an optimized tension control system is developed in this study.

KEY WORDS: Fiber reinforced composite 섬유 강화 복합재료; Pressure Vessel 압 력용기; Filament winding 필라멘트 와인딩; Tension Control 장력 제어;

- x -

제1장 서론

1.1 연구 배경

자동차 연료로 친환경 에너지인 수소가스, 천연가스 수요가 급증하게 되고, 이러한 연료들을 효율적으로 저장, 활용하기 위해서는 경량 복합재료 연료탱크 가 필연적으로 필요하며, 그 수요가 급증되고 있다. 복합재료는 비강도 (specific strength)와 비강성 (specific modulus)이 일반 금속재료에 비하여 대단 히 우수한 특성을 나타내며, 내식성 및 진동, 충격, 피로 특성이 강한 장점이 있다. 이러한 장점 때문에 항공우주산업, 각종 자동차 부품 산업뿐만 아니라 건 축 보강재, 레져용품 등으로 그 적용 분야가 넓어지고 있다(최창근, 2001). 특히 자동차 분야에 복합재료 사용은 더욱더 확산되고 있으며, 그중 수소연료전지차 의 보급이 활발히 이루어지고 있다. 2014년에 현대자동차에서 수소연료전지를 탑재한 투산 SUV 차량을 지방자치단체에서부터 점차 개인에게로 보급하겠다 밝혔다. 여기에 들어가는 수소저장 탱크는 탄소섬유로 제작되었다. 무게 85kg, 부피 104L이며 700기압의 압축 수소가 저장되었다(Lee, 2014). 현재 현대자동차 에서 넥쏘에 수소연료전지를 탑재하여 상용화시키고 있다. 투산보다 더 많은 수소를 저장할 수 있는 기술로 더 많은 거리를 이동할 수 있게 하였고, 전국적 으로 '수소 충전소'도 점점 확산되고 있는 추세다. 연료전지 차량용 수소저 장 방식은 액화수소 저장방식, 압축 수소 저장방식, 수소저장 합금 방식, 화학 수소화물 방식, 초저온 고압 수소저장 방식 등 여러 가지 기술들이 경합을 해 왔으나 현재 대부분의 자동차 회사는 압축 수소 저장방식을 적용하고 있다.

과거의 압축 수소 저장방식은 350bar와 700bar 탱크 시스템이 사용되었으나 최근에는 700bar 탱크 시스템을 사용하는 추세이다. 압축 수소 저장용기도 탄 소섬유를 감는 탱크 내의 라이너 종류에 따라 Type 4와 Type 3로 나뉜다. 알

루미늄 라이너를 사용하는 Type 3의 경우 탱크에 국부화재가 발생했을 때 라 이너를 통해 열전달이 잘되므로 Thermal Relief valve의 작동에 유리한 면도 있다. 또한, 플라스틱 라이너에 비해 알루미늄 라이너의 열용량이 커서 700bar 로 수소를 충전할 때 탱크 내의 온도 상승도 Type 4에 비해 적게 올라가는 장 점도 있다. 그러나 알루미늄과 외부에 감은 탄소섬유의 열팽창 방향이 반대이 므로 열팽창 시 탄소섬유에 추가의 응력이 발생한다. 이를 고려하면 탄소섬유 를 더 감아 무게가 증가하고 가격이 상승한다. 이로 인해 최근에는 차량에는 Type 4 탱크를 적용하고 충전소에서 냉각된 수소를 충전하는 방법을 사용 중 이다. 수소탱크 외에도 수소저장 시스템의 주요 구성부품은 압력 조절 밸브, 탱 크내장형 솔레노이드 밸브, 압력센서, 수소센서 등으로 이루어져 있다(Choi & Lim, 2012). 수소연료전지차의 연료탱크의 제작은 섬유강화 복합재료의 대표적 인 성형공법 중 하나인 필라멘트 와인딩 공법을 이용하여 제작된다. 필라멘트 와인딩 머신(filament winding machine)을 이용한 수소연료전지차용 연료탱크 제작 공정을 보면 플라스틱(PA 계열) 라이너에 복합재료를 이용하여 설계된 와 인딩 패턴에 따라서 감고 경화로에서 경화 사이클에 맞추어 경화하여, 경화 후 성능을 시험하여 연료탱크가 만들어진다. 연료탱크를 제작하는 과정에서 필라 멘트 와인딩 공정 중에 중요한 요인을 보면 온도, 습도, 수지관리 그리고 섬유 의 장력이 있다. 와인딩 시 패턴에 따라 섬유의 장력을 일정하게 가지면서 와 인딩을 하게 되는데, 이때 섬유의 장력 제어가 탱크 성능에 매우 중요한 역할 을 하게 된다.

섬유의 장력을 일정하게 하는 방법에는 여러 가지가 있는데, 과거에는 전기 를 이용한 파우더 클러치(clutch) 방식, 에어를 이용한 클러치(clutch) 방식을 많 이 이용하였으나, 최근에는 모터를 이용하여 섬유 장력을 제어하는 방식을 많 이 이용하는 편이다. 섬유의 장력은 와인딩 시작부터 끝날 때까지 제품의 두께 와 상관없이 일정한 장력을 가지면서 와인딩 되어야 하고, 또한 생산성 향상을 위해서는 와인딩 속도가 증가 되어야 하는데 와인딩 속도가 증가 되어도 일정 한 장력으로 고속으로 제어하는 장력 장치가 필요하게 된다.

1.2 필라멘트 와인딩 공법

1.2.1 필라멘트 와인딩 성형방법 및 장치

필라멘트 와인딩 성형기법은 수지가 함침 된 연속섬유를 회전하는 심축 위에 감아서 주로 파이프나 압력용기, 로켓 모터 케이스 등과 같은 축대칭 복합재료 구조물을 제작하는 방법이다. 필라멘트 와인딩 섬유로는 표면이 특수처리된 유 리섬유를 주로 사용하고 있으나, 높은 비강도와 비강성도가 요구되는 항공기 복합재료 부품과 같은 경우에는 탄소섬유나 케블라섬유를 사용한다[전의진 등, 1995]. 필라멘트 와인딩 성형은 심축의 회전속도와 섬유의 공급 위치를 이동시 키는 캐리지 (carriage)의 속도를 조절하여 일정한 와인딩 각도와 패턴으로 수 지가 함침 된 연속섬유를 심축에 감을 수 있는 성형기를 이용한다. 와인딩 각 도는 심축의 방향과 거의 일치하게 감는 축방향 와인딩(longitudinal winding)에 서 축에 거의 수직으로 감는 원주방향 와인딩(hoop winding)까지 심축 회전속도 와 캐리지 이동 속도비에 따라 조절된다. 와인딩 방법에는 수지를 섬유에 함침 시키는 시기에 따라 습식 와인딩법과 건식 와이딩법으로 구분되는데, 습식 와 인딩법은 와인딩하는 과정에서 섬유가 수지 함침용기(resin bath)를 통과할 때 수지가 함침되어 바로 심축에 감는 방법이며, 건식 와인딩법은 이미 수지가 섬 유에 함침되어 경화가 일부 진행된 B stage 프리프레그 로빙(roving)을 심축에 감는 방법이다. 설계상의 두께까지 와인딩 되면 와인딩 된 심축을 와인딩기에 서 떼어 내어 경화로(curing oven) 안의 회전축에 걸고 회전시키면서 경화시킨 다. 와인딩된 제품을 경화 사이클에 따라 경화시킨 후에 심축을 탈형하고 필요 에 따라 표면을 가공하는 과정이 일반적인 필라멘트 와인딩 성형과정이다.

복합재 연료탱크의 구성은 라이너 및 복합재료로 나누어진다. 라이너는 플라 스틱계열을 이용하며 복합재료는 강화섬유 및 수지로 구성된다, 연료탱크에 복 합재료가 감기는 와인딩 패턴은 Helical 및 Hoop 모드로 구성되며, 와인딩의 두 께는 설계된 패턴에 맞추어 여러번 반복하면서 와인딩 하게 되는데 여러 패턴 을 와인딩 하므로 와인딩 시간을 길어지게 된다[Takashi et al, 2002]. 습식 와인딩 시에는 섬유에 수지를 함침시키는 공정이 시간을 소요하므로 전 체적인 와인딩 시간은 길어지게 된다. Fig. 1은 Filament Winding Machine 구성 도이며 연료탱크를 와인딩 하기 위해선 기본적으로 4축 설비에서 와인딩 된다.

4축의 의미는 4개의 축이 동시 보간 기능으로 프로그램된 패턴으로 각 축이 움직이면서 와인딩하는 것을 말한다. 4축의 기능을 살펴보면 멘드릴을 회전시 키는 회전축과 섬유를 가지고 멘드릴 좌우로 움직이는 케리지 축, 케리지 축에 서 전, 후로 움직이는 크로스 캐리지 축, 그리고, 아이(Eye)가 정면에서 좌우로 움직이는 아이 축으로 구성된다. Fig. 2는 필라멘트 와인딩 공정으로 제작한 제 품들이며 산업용 파이프 형태, 소방관용 압력용기, LPG 용기 등 여러 형태의 제품 등이 있다,



Fig. 1 Filament Winding Machine System



Fig. 2 Various products made by filament winding technology

1.2.2 와인딩의 종류 및 장력 장치의 방식

필라멘트 와인딩의 작업 방식은 2가지로 습식 와인딩 및 건식 와인딩이 있는 데, 현재는 습식 와인딩을 많이 이용하는 편이다. 습식 와인딩은 수지를 섬유에 함침 하면서 와인딩 하는 방법으로, 와인딩 시 섬유의 장력 값은 1~2 kgf 정 도이며, 장점으로는 원재료에서 가격이 저렴하지만, 수지 흐름으로 인한 주변 환경이 좋지 않다는 단점이 있다.

전식 와인딩(Towpreg winding)은 섬유에 수지가 미리 함침되어 있는 로빙을 이용하여 와인딩을 하는 방법이며, 섬유에 수지가 함침되어 진득함이 있어 섬 유가 이동하는 경로의 재료는 대부분 회전 롤러를 사용한다. 섬유의 장력 값은 4~5 kgf 정도이며, 장점으로는 섬유에 수지 함침비가 일정하며, 습식 와인딩에 서 작업하는 수지관리가 필요 없으므로 주변 환경이 청결함과 와인딩 속도를 증가시킬 수 있어 제품 생산성을 올릴 수 있으나, 원소재의 가격이 높아 현재 는 이용하는 편이 적지만 국내외 관련 업체에서 저가의 Towpreg 개발을 하고 있으므로 향후에는 점차 많이 사용될 것이라 기대할 수 있다.

Internal roving은 섬유를 roving의 안쪽에서 뽑는 형태이며, 대부분 유리섬유 의 형태가 많다. 섬유의 끝부분과 다음 섬유의 시작 부분을 매듭 해 놓으면 연 속해서 섬유를 사용할 수 있다. Internal roving의 형태의 유리섬유를 이용하여 생산하는 파이프 및 LPG 용기 등은 연속적으로 섬유를 사용함으로써 섬유를 매듭하는 시간을 줄여주므로 생산성을 올릴 수 있는 장점이 있다. Fig 4와 같 이 Internal Roving 섬유의 장력을 가하는 방법은 대부분 기계적 마찰을 이용하 는 것이 많으며, 마찰이 작용하는 직전 단계에는 섬유의 장력이 없지만 마찰봉 의 각도를 달리하여 장력을 발생시키며 또한 와인딩 시 섬유의 속도에 따라 장 력 값이 달라질 수 있다. 제품 생산 시에 Internal Roving을 이용하여 제품을 생산할 때, 와인딩 속도는 변화하지 않고(등속도), 항상 같은 속도로 와인딩 하 는 것이 좋다.

External roving은 보통 3인치 지관(紙冠)에 감겨있는 형태가 대부분이며, 섬 유를 Roving 바깥쪽에서 빼는 방법이며, 섬유의 종류에는 탄소섬유, 아라미드 섬유, S-2 유리섬유 등이 있다. 또한, 유리섬유의 Internal Roving의 섬유를 Rewinding 하여 사용하는 경우가 있는데, 이때는 생산 공정에서 완성된 섬유를 Rewind하므로 섬유의 표면이 좋지 않아, 와인딩 시 보풀(Fuzzy)이 생길 수가 있다. 요즘에는 생산공장에서 Internal Roving의 섬유를 직접 Rewinding 하여 생산되므로 와인딩 할 때 보풀은 덜 생긴다.



Fig. 3 Internal and external roving type



Fig. 4 Friction tension device for internal roving fiber

1.2.3 External Roving 장력 제어기의 장력 검출부 구조

External Roving 장력 제어기의 장력 검출부 구조는 여러 가지가 있으나 기 본적으로 로드셀 3점 방식과 로드셀-센싱바 방식으로 나눌수 있다. 로드셀 3점 방식은 공간 활용성이 우수하고 로드셀 집중으로 센서 앰프 노이즈 차단이 용 이하며 장력 제어성이 우수하나 와이어 설치가 복잡하고 섬유의 보풀이 많이 생겨 작업자의 어려움이 있다. Fig. 5는 로드셀 3점 방식 블록도이며, 섬유가 스풀에서 빠져나와 가이드 롤러를 거치고 집중되어있는 로드셀 3점 블록으로 모이게 되는 방식이다. 섬유가 3점 로드셀에 모이게 되면서 섬유의 보풀이 조 금 더 생기게 되어 와인딩 도중에 장비를 일시 정지하고 보풀을 정리하는 시간 이 필요하므로 생산성이 떨어지는 단점이 있다. 로드셀-센싱바 방식은 공간 활 용 우수하고 작업자의 와이어 설치 작업 용이하다. 로드셀 분산 및 모터측 근 접으로 노이즈 차단 방법이 필요하지만 로드셀 롤러가 없으므로 작업상 유리하 다. Fig. 6은 로드셀 3점 방식의 실제 장비의 예이다.

Fig. 7은 로드셀-센싱바 방식으로 로드셀의 위치는 섬유가 스풀에서 나와 가 이드 롤러를 거치고 센싱바를 거치며 기계쪽으로 빠져나갈 때 로드셀에 센싱하 는 방법은 센싱바에 연동해서 장력기 프레임 뒤쪽에 설치되어있는 로드셀에 힘 을 가하여 섬유의 장력을 측정하는 구조로서 장력기 롤러에 섬유의 보풀이 덜 생겨 작업성이 좋다. 현재 로드셀-센싱바 방식이 많이 적용되고 있다.



Fig. 5 Tension measurement by using 3 rollers



Fig. 6 Example of tension measurement by using 3 rollers



Fig. 7 Example of tension measurement by using sensing rollers

1.3 필라멘트 와인딩 장력 제어 연구 동향

Metiny 와 Ellyin(2002)은 와인딩 시 장력이 물리적, 기계적 특성에 미치는 영 향에 대해서 연구하였다. 장력에 따라 달라지는 섬유 체적률, 와인딩 된 압축 시편의 강도 시험을 진행하였다. 장력이 증가함에 따라 섬유체적률이 증가하고 두께가 약간 작아지며, 섬유가 하중을 많이 받는 시험의 경우에 강도가 증가하 지만 수지가 지배적인 하중 조건의 경우 파단 강도를 낮춘다는 것을 확인하였 다.

Takashi 등(1999)은 실시간으로 장력을 측정하고 제어할 수 있는 새로운 필라 멘트 와인딩기를 제작하였다. 맨드릴의 회전속도와 탄소섬유 토우를 와인딩 릴 에서 멘드릴까지 이송시키는 Nip roll의 회전속도의 차이를 이용하여 와인딩 장 력을 제어하는 것이 가장 효과적임을 확인하였다. 또한, 이 능력을 향상시키기 위해 2 자유도 PID 제어로 확장하여 와인딩 장력의 서보 제어를 효과적으로 수 행하도록 하였다. 그 후 ring burst 시험을 통해 와인딩 장력과 탄소섬유 강화 복합재료 링의 인장강도를 시험하여 장력이 높을수록 인장강도가 높음을 확인 하였다.

이승호(2002)는 필라멘트 와인딩 머신에 적용되는 장력 제어 시스템과 퍼지 -PID 장력제어 알고리즘을 개발하였다. 실시간 장력 제어 시스템과 그 동작을 확인한 뒤 퍼지 논리 제어, 퍼지 추론 시스템, 퍼지 제어기 설계, 입출력 변수 및 입출력 공간의 선정, 입출력 공간의 퍼지 분할과 함수 선택, 퍼지 규칙 설계 를 통해 퍼지-PID 알고리즘을 산출해내었다. 이후 PID 알고리즘을 사용하는 장 력 시스템과의 장력 변화 폭 비교를 통하여 장력기의 성능을 평가하였다.

Li(2015)는 퍼지 뉴럴 네트워크를 이용하여 필라멘트 와인딩의 장력 제어 시 스템을 개발하였다. BP 알고리즘을 사용하여 퍼지 뉴럴 네트워크 제어기와 장 력 제어 시스템 예측 모델을 훈련시키며 최적의 구조 및 매개변수 뿐만 아니라 우수한 동적 특성을 갖는 퍼지 뉴럴 네트워크를 얻는다. 기존 PID 제어기로 진 행한 시뮬레이션과 비교하여 우수한 동적 응답, 견고성, 제어 정확성 및 안정성 이 우수하다는 것을 확인하였다. Shi 등(2012)은 일정한 신장비를 기반으로 하는 복합재료의 불연속 테이프 와 인딩을 위한 가변 장력 제어를 연구하였다. 장력 제어의 문제를 해결하기 위하 여 장력, 신장률, 자동 제어 방법과 상호작용 메커니즘에 대하여 연구를 수행한 다. 그 후 PID 제어기를 설계하였고 본 프로그램을 통해 테이프의 일정한 신장 비를 도출하였고 와인딩 공정상에 자동화 정도도 향상이 됨을 확인하였다.

Nikat 등(2008)은 필라멘트 와인딩 시에 PID 제어를 이용한 pretension 제어 시스템을 설계하였다. 실시간으로 피드백하여 제어하는 본 방식으로 원하는 변 수와 실제 값의 오차를 모니터링 하고 이에 따라 제어를 조정하였다. 본 시스 템으로 섬유의 장력이 목표 장력 값의 10% 이내에서 일정하게 유지됨을 확인 하였다.

1.4 연구 목표

복합재 성형공법 중 필라멘트 와인딩 공정은 다른 공법에 비해 시간이 많이 소요되는 단점이 있다. 특히 압력이 높은 연료탱크를 와인딩으로 제작하려고 하면 소요되는 섬유의 길이가 매우 길어지게 되므로 더욱 많은 시간이 소요되 므로 생산성이 저하된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 와인딩 공정을 고 속화할 필요가 있는데, 고속 와인딩 시에도 제품에 감기는 섬유의 장력은 일정 하게 유지하면서 고속으로 제어되어야 할 필요가 있다. 특히 헬리컬 와이딩 작 업을 고속으로 진행할 때, 섬유를 제품에 감기 어렵고 와인딩 기계의 빠른 가·감속이 필요로 하게 된다.

본 연구에서는 로드셀-센싱바 방식의 장력 제어장치를 제작하고, 고속 및 높 은 가·감속 운전 조건에서 적절한 운용이 가능하도록 장력 장치의 성능을 향 상시키고자 한다. 이를 위해 장력장치가 섬유의 빠른 가·감속을 추종하면서 제어를 하기 위해서 실시간으로 섬유 스풀의 크기를 측정하고, 이에 따른 관성 부하의 변화에 대응하여 최적의 제어 게인을 자동으로 조절하는 기능을 갖춘 섬유 장력 제어기를 개발하고자 한다. 이러한 적응제어 기술을 이용하여 연속 최대속도 3m/s 및 최대 가속도 $20m/s^2$ 을 구현할 수 있는 장력 장치를 연구 하여 제품에 적용하고자 한다.

제 2 장 장력 제어 시스템 구성

2.1 적응제어를 위한 장력기의 구성



Fig. 8 Structure of tension system with adaptive control capability Fig. 8에서 스풀에서 나온 와이어는 텐션암의 롤러를 거치고, 장력 측정 롤러 를 지나 와인딩 머신으로 공급된다. 이때 로타리엔코더가 연결되어있는 와이어

길이 검출용 롤러를 지나면서 컨트롤러에 와이어 공급량을 알려주게 된다. 와 이어에 장력이 걸릴 때 Tension Arm에 연결되어있는 스프링은 변형을 일으켜 장력 값이 급격히 변화하지 않도록 적절한 유연성(Compliance)을 제공한다.

와이어 장력은 센싱롤러가 설치되어있는 센싱암이 로드셀을 누르게 됨으로써 직접적으로 측정이 된다. 로드셀의 힘은 로드셀 앰프(Strain Amp)를 거쳐 콘트 롤러로 전달되며, 콘트롤러 내부의 A/D 변환기를 거쳐 디지털 값으로 변환된 다.

컨트롤러는 입력된 장력값과 설정된 장력값을 비교하여 오차가 제거될 수 있 도록 서보 드라이버에 적절한 지령을 내 보내는 Fully Closed FeedBack PID 제 어를 수행한다. 이러한 서보 컨트롤러의 작동은 제어판넬(Control Panel)을 통해 사용자가 조작하는 것이 가능하도록 구성되었다.



Fig. 9 Trajectory of fiber from spool

2.2 Full Closed PID 서보 제어기의 구성



Fig. 10 Fully Closed Feedback Control System Diagram

장력 제어기는 기본적으로 사용자가 지령한 기준 장력 값에 현재 장력 값을 맞추는 제어를 수행하는 것이다. Fig. 10에서 기준 장력 값과 현재 장력 값의 오차 e는 PID 제어기로 전달되고, PID 제어기 내에서 적절히 계산된 출력값 U 가 서보 앰프로 전달된다.

서보모터 및 서보 드라이버를 토크 제어 모드로 설정함으로써 서보모터의 회 전축에는 지령된 토크 출력이 나오게 된다. 이 회전 토크는 모터축에 연결되어 있는 와이어 스풀을 회전 가속시키게 되므로 와이어 스풀의 회전관성모멘트 (*Js*) 에 반비례하는 각가속도(α)가 얻어지게 된다. 이를 식 (1)과 식 (2)에 수식 으로 표현하였다.

$$T = Js \bullet \alpha \tag{1}$$

$$\alpha = T/Js$$

(2)

이 가속도는 다시 적분되어 스풀의 회전속도가 얻어진다.

스풀의 회전속도 즉 와이어 공급속도가 와인딩 기계의 요구 속도와 같지 않 을 경우, 이 속도의 차이는 적분되어 와이어 장력으로 변동되고, 이러한 와이어 장력 변동 값은 로드셀로 측정하여 장력변동이 일어나지 않도록 시스템이 구성 되었다.

2.3 Adaptive PID Servo Control



Fig. 11 Adaptive PID Servo Control

일반적인 시 불변 선형제어시스템의 경우, 시스템 제어장치의 제어게인 즉 비례게인 (K_p), 적분게인 (K_i) 그리고 미분게인 (K_d)은 초기에 적절히 튜닝을 해 둠으로써 연속적으로 사용하는 것이 가능하다. 즉 와이어 스풀의 무게 변화 가 일어나지 않는 경우에는 서보제어계를 최적으로 설정(Tuning)해 두면 연속 사용이 가능하다.

그러나 본 연구에서 대상으로 하는 섬유 장력 조절장치의 경우에는 와이어 스풀의 와이어를 지속적으로 공급하는 것을 목적으로 하므로, 시간이 지나면서 와이어 스풀의 무게가 줄어들게 된다. 이는 모터축에 연결되어 있는 관성부하 (*Js*) 가 시간이 지나면서 점차 감소하는 것을 의미하며 장력 제어 시스템의 플 랜트(Plant) 상태가 바뀌어 감을 의미한다.

관성 부하의 변동량을 간략히 검토하면, 초기 스풀의 크기를 200mm, 무게 10kg로 가정하고, 최종 스풀의 크기를 85mm, 무게 100g으로 가정할 경우 회 전관성모멘트의 변화율이 약 16배에 해당한다. 이러한 정도의 부하관성모멘트 의 변화가 일어나는 제어 시스템은 일반적으로 동일한 제어 파라미터의 설정으

로는 요구되는 최적의 성능을 만족하기가 매우 어렵게 된다. 따라서 관성 부하 의 변화에 따라 제어 시스템의 게인을 적절히 조절하여주지 않으면 제어기의 안정성을 보장할 수 없게 된다.

본 연구에서는 와이어 스풀의 관성 부하의 변화에 따라서 서보 제어기의 PID 게인을 적절히 조절하는 적응제어방법을 도입하였다. Fig. 12에 본 연구에서 사용하고자 하는 적응제어기의 제어부 구조를 나타낸다. 적응제어 기법에 있어서 시스템 상태에 따라 가변시키고자 하는 제어 인자의 선택은 여러 가지가 있을 수 있다. PID 서보제어 장치의 비례, 미분 및 적분 게인을 모두 독립적으로 조절하든지 또는 제어기의 최종 출력을 조절하는 것 등이 가능하지만, 본 연구에 서는 사용의 간편성을 위해 그림에 나타낸 바와 같이 PID 제어기 안에서 비례 게인(K_p)만을 조절하는 방법을 선택하였다. 또한, 스풀의 크기에 따라 자동으로 조절할 비례게인은 Fig. 13에 나타낸 바와 같이 최대 스풀 사이즈(200*mm*)와 최소 스풀 사이즈(85*mm*)에 최적화된 각각의 비례게인 K_p200 및 K_p85 를 먼저 실험적으로 구한 후, 변화하는 임의의 스풀 사이즈에 대해서는 스풀 크기에 따라 산형보간법으로 계산된 비례제어 게인을 사용하는 방법으로 하였다. 스풀의 관성 부하의 변화를 검출하기 위해서는 스풀의 직경 변화를 측정하는 방법이 필요하게 된다.



Fig. 12 Adaptive PID control scheme



Fig. 13 Change of proportional gain(Kp) for adaptive control

2.4 Adaptive PID 서보 제어를 위한 Spool 직경 측정방법



Fig. 14 In-process wire spool diameter measurement

모터축 관성부하의 변동에 따라 제어게인을 조절하는 적응제어기법을 사용하 기로 하였으므로, 섬유 장력 제어 중에 와이어 스풀의 크기를 측정하는 방법이 필요하다.

이를 위해서는 Fig. 14에서 모터의 1회전당 실제 와이어의 이동거리를 측정하 여 스풀의 원주거리를 측정하고 이를 통해서 스풀 지름을 구하는 방법을 사용 한다. 와이어가 공급되는 경로상에 센싱롤러를 설치하고 롤러의 회전량을 로터 리엔코더로 측정하기로 한다. 이 센싱롤러의 회전량은 실제 와이어가 지나간 양에 비례한다. 한편 동시에 모터축의 회전량도 모터에 장착되어있는 회전엔코 더를 통해 측정하는 것이 가능하다.

본 연구에서는 모터의 1회전량을 검출하고, 동시에 모터 1회전 동안의 센싱 롤러 회전펄스수를 측정함으로써 스풀의 크기를 측정할 수 있는 방법을 사용한 다. 센싱롤러의 엔코더 분해능과 직경을 미리 알고 있으므로 스풀의 직경은 간 단히 측정 가능하다.

와이어 엔코더의 1회전당 펄스수를 *Pe*, 모터 1회전 하는동안 검출된 와이어 엔코더의 펄수 수를 *Pw*, 와이어 센싱롤러의 직경을 *Dw* 라고 하면 스풀 직경, *D*는 식 (3)과 같이 계산할 수 있다.

 $D = (P_w/P_e) \times D_w$

(3)

이와 같은 적응제어기능을 가진 장력 장치를 이용함으로써 종전의 시스템에서 불안한 제어요소를 제거함과 동시에 섬유의 장력 제어를 보다 안정적으로 제어 할 수가 있는 실험을 진행하고자 한다.

제 3 장 실험 방법

3.1 장력 제어 시스템 실험장치

본 연구의 실험장치는 Fig. 15와 같이 서보모터 및 드라이브, 엔코더, 컨트롤 러, 조작판넬로 구성되어 있으며, 로드셀 검출 방식은 센싱바 롤러을 이용하였 다. 장치구성을 살펴보면 서보 모터축에 스풀을 고정 하기위한 에어척이 있으 며, 섬유의 급격한 변화를 완화시키는 완충장치를 만들어 주기 위하여 실린더 및 스프링을 이용한 템퍼 장치와 섬유가 지나는 경로에 롤러를 이용하고 롤러 의 재질은 아세탈, 테프론 및 AL6061을 사용하였다. Fig. 15는 Wire의 속도를 측정하는 엔코더가 장착된 모습이다. 롤러는 Wire가 지나갈 때 보풀(Fuzzy)이 적게 생기도록 테프론으로 제작하여 사용하였다. Fig. 16은 Spool에서 나온 Wire의 경로 및 완충장치을 나타낸 모습인데 Spool을 고정하는 방법은 에어척 에 에어를 주입하여 부풀려 Spool 내경을 잡을 수 있도록 되어 있으며, Wire의 사용으로 빈 지관만 남을 때는 에어척 앞쪽 버튼을 눌러 에어를 빼면 지관을 교체할 수 있는 구조로 제작·설치되었다.



Fig. 15 Experimental setup



Fig. 16 Detailed view of Encoder block & tension mechanism

실험장치 제작에 사용된 부품 사양은 Table 1과 같다.

N0.	Part name	Specification		Maker
1	Servo Motor	FE06M	600W/1000RPM	LS Mechapion
2	Load Cell	BCL-20	20kgf/2.0mV/V	CAS loadcell
3	Encoder	E40SB-100-6	100Pluse	Autonics
4	Controller	ServoCon	50MIPS, 12bit AD	Hybrid Precision
5	Control Panel	PTC-24, R19	100MIPS, 8bit	PICO Industry

Table 1Specification of parts

섬유의 재료는 직경 Ø200의 탄소섬유 및 Ø85 케블라섬유가 적용되었고, 섬 유를 감는 장치는 4축 제어 와인더가 적용되었다. 와인더의 콘트롤러는 Pmac 社의 4축 Real Time Controller로 가·감속 Motion을 만들어 실험하였다. 또한, 실험데이터를 확보하기 위하여, RIGOL 社의 DS1052E 오실로스코프를 활용하 며, PC에 저장을 위하여 12bit A/D 변환기를 같이 사용하였으며 모터 드라이브 에 공급하는 전원은 단상 220V를 공급하였다. Adaptive PID Servo Control 역할을 하는 SercoCon의 블록도는 Fig. 17과 같 다.



Fig. 17 Block Diagram of Servo Controller

서보 콘트롤러 보드의 중앙처리장치(MCU)는 Intel 8051의 구조를 가진 Silabs 社의 C8051F410을 이용하였다. MCU의 최대 처리 속도는 약 50*MIPS* 정 도이다.

장력을 측정하는 로드셀은 측정범위안에서 변화가 매우 미약하기 때문에 이 를 효과적으로 측정하기 위해 전용의 스트레인 앰프를 이용하였다. 스트레인 앰프의 출력은 장력 값에 따라 0~10V가 되도록 조정하였다. 스트레인 앰프의 출력 전압은 서보 콘트롤러 보드의 아날로그 입력단자로 보내지고, 12bit A/D 변환기를 거쳐 디지털 값으로 변환된다.

와이어의 이송량을 측정하는 센싱롤러에 부착된 로터리엔코더와 서보모터의

로터리엔코더에서 출력되는 전기신호는 각각 90도의 전기적 위상각을 갖는 A/B 상의 두 개의 디지털 펄스신호인데, 각각의 신호는 다시 두가닥의 전선을 이용 하여 차등신호의 형태로 출력된다. 이러한 신호를 MCU에 보내기 위해 Line Receiver 회로를 사용하여 단일신호로 만들고 이들을 MCU의 인터럽트 신호선 에 입력하여 고속 카운팅이 가능하도록 한다.

MCU는 상위 콘트롤러와 통신을 하기 위해 내장되어있는 비동기통신기능 (UART)의 통신선을 RS485 전기신호로 변환시켜 양방향 통신이 가능하게 한다. RS485 통신을 채택한 이유는 하나의 상위콘트롤러를 이용하여 다수의 서보 콘 트롤러와 통신이 가능하도록 작은 네트워크를 구성하기 위해서이다. 상위 콘트 롤러로부터의 명령 값과 아날로그 입력, 그리고 엔코더 입력으로부터 서보 제 어기의 출력 값이 계산되면 그 결과는 MCU에 내장되어 있는 D/A 변환기를 이 용하여 아날로그 전압으로 출력한다. MCU로부터 출력되는 아날로그 전압은 0~1V 사이이며, 이를 -10V ~ +10V의 출력값으로 변환하기 위해 다시 아날로그 증폭기를 이용한다. 이러한 아날로그 출력전압은 서보 드라이버를 제어하기 위 한 다른 신호들과 함께 서보드라이버의 입출력단자로 보내진다.

3.2 실험조건 및 방법

본연구의 실험 조건은 Table 2와 같다.

첫 번째는 Spool의 크기를 최소 85mm 와 최대 200mm을 기준으로 한다.

두 번째는 와이어 속도를 1 m/s, 2 m/s, 3 m/s 3가지 기준을 둔다.

세 번째는 와이어의 가속시간을 0.1*s*, 0.2*s*, 0.3*s*, 0.4*s*, 0.5*s* 5가지 기준을 둔다.

네 번째는 와이어의 장력값은 2 kgf, 과 4 kgf 2가지로 실험한다.

No.	Parameters	conditions	Remarks
1	Spool size	D1 = 200 mm	D1: Max. spool diameter
1	Spool size	D2 = 85 mm	D2: Min. spool diameter
		1 m/s	
2	Wire Speed	2 m/s	
		3 m/s	
3		0.5 <i>s</i>	
	Wire Acceleration time	0.4 <i>s</i>	
		0.2 <i>s</i>	
		0.1 <i>s</i>	
4	Transier	$2 \ kgf$	
	Tension	$4 \ kgf$	

Table 2 Experimental parameters and conditions

본 실험에서 나타내는 변수의 기호는 다음과 같다.

K_p	: 비례계인
K_i	: 적분게인
K_d	: 미분게인
D	: 스풀 직경
U	: 서보제어기 출력전압
M	: Motor
Js	: 서보모터 회전축에 부착된 섬유 스풀의 회전관성모멘트
1/S	: 적분요소
α	: 섬유 스풀(모터 회전축)의 각가속도
ω	: 섬유 스풀(모터 회전축)의 각속도,

본 장에서 기술한 실험장치 및 실험 조건에 따라 다음과 같은 관점에서 장력 기 제어 실험 결과를 고찰하고자 한다.

(a) 와이어 속도에 따른 장력 제어 특성의 변화

(b) 가속도의 변화에 따른 제어 특성의 변화

(c) 설정 장력에 따른 제어 응답의 변화

(d) 제어 게인에 따른 제어 특성의 변화

(e) Spool Size에 따른 모터 제어 신호의 변화

(f) Spool Size에 따른 제어 특성

(g) Spool Size에 따른 최적 게인의 변화

(h) 실시간 Spool크기 측정 실험

제 4 장 실험 결과

4.1 와이어 속도에 따른 장력 제어 특성의 변화

Fig. 18과 Fig. 19는 각각 스풀 직경 85mm, 제어게인 K_p =100, 와이어 가·감 속 시간 0.5s 설정 장력 2kgf의 제어 실험 결과를 나타낸다. 각각의 그림 중 상단은 와이어의 속도 그래프, 중간은 와이어의 장력 값을 나타내며, 하단은 서 보 제어기가 출력한 제어 전압의 값을 나타낸다. Fig. 18은 와이어 속도 1 m/s 의 제어 실험 그래프이다. 그림에서 와이어의 장력은 가속이 끝난 1.5s ~ 2.5s 사이에서 약간의 흔들림을 나타내고 있으나 시간이 지나 와이어 장력의 흔들림 이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 와이어 진행이 멈추는 4.5s ~ 5.5 s 사이에서도 나타남을 볼 수 있다. 즉 제어 시스템의 입력에 변화가 발생하여 도 시간이 흐름에 따라 진동이 감쇠함을 알 수 있다. Fig. 19는 동일한 시스템 에 와이어 속도 3 m/s의 제어를 수행한 결과이다. 동일한 가속시간에 더 높은 속도로 와이어를 이동시킴에 따라 와이어 가속구간 및 감속 구간에 약간의 오 버슈트(over shoot)와 언더슈트(under shoot)가 발생함을 볼 수 있다. 그러나 와 이어가 주행 중에 장력이 높은 주파수의 흔들림이 나타나는 것을 알 수 있다.

이러한 와이어 주행 속도의 차이에 따른 장력의 흔들림의 특성은 주로 스풀 의 편차에 기인하는 경향이 있다. 즉 와이어가 스풀에서 풀릴 때 스풀의 편차 에 따른 와이어 풀림 속도의 차이가 장력의 편차로 나타나며, 특히 스풀의 회 전속도가 빠를수록 장력의 편차가 고주파의 특성을 가지면서 더욱 큰 값으로 나타나게 된다.









4.2 가속도의 변화에 따른 제어 특성의 변화

Fig. 20과 Fig. 21는 각각 스풀 직경 85 mm, 제어게인 K_p=100, 와이어 주행 속도 2 m/s, 설정 장력 2 kgf의 제어 실험 결과를 나타낸다.

Fig. 20은 와이어의 가속시간을 0.4s로 하여 와이어를 주행시켰을때의 제어 실험 결과를 나타낸다. 가속시간 중에 장력값에는 비교적 작은 값의 오버슈트 가 관측된다. 와이어의 가속도가 약 5 m/s^2 정도가 되며, 이는 비교적 낮은 가 속도로 사료된다. 그러나 와이어 정속 주행 중에는 앞의 실험 결과와 같이 스 풀 불균일에 기인한 장력의 흔들림이 관측된다.

Fig. 21는 동일 조건에서 가속시간 0.1*s*로 와이어를 주행시켰을 때의 제어 실 험 결과이다. 와이어의 가속도는 약 20 *m/s²*에 해당하며, 가속 및 감속 시간 중에 장력 값에 비교적 큰 오버슈트가 관측되고 있다. 컨트롤러의 출력 전압도 이러한 오버슈트를 제거하기 위해 비교적 큰 변화를 보이고 있음을 알 수 있 다.



Fig. 20 Experimental result of wire acceleration time $Ta=0.4 \ s$ (D=85mm, $K_p=100$, V=2m/s, $T=2 \ kg f$)



Fig. 21 Experimental result of wire acceleration time $Ta=0.1 \ s$ $(D=85mm, K_p=100, V=2m/s, T=2 \ kgf)$

4.3 설정 장력에 따른 제어 응답의 변화

Fig. 22와 Fig. 23은 각각 스풀 직경 200 mm, 제어게인 K_p=600, 와이어 주행 속도 2 m/s, 가속시간 0.4 s의 제어 실험 결과를 나타낸다.

Fig. 22는 제어 장력을 2 kgf로 하였을 때의 제어 실험 결과이며, Fig. 23은 제어 장력을 4 kgf로 하였을 때의 제어 실험 결과이다. 동일한 와이어 가·감 속 시간 및 주행속도이므로 가속 및 감속시간에 비교적 유사한 제어 특성을 가 지는 것을 볼 수 있다. 그러나 와이어의 정속 주행중에는 제어 장력이 큰 쪽의 장력 값이 상대적으로 안정되어 있음을 볼 수 있다.

와이어 장력이 높을수록 장력의 흔들림이 적은 것은 상대적으로 큰 장력이 기구부에 미치는 힘이 커지므로 각 기구부의 베어링 등에 미치는 마찰력이 증 가하여 시스템이 상대적으로 안정되고, 와이어와 가이드 롤러 사이에도 마찰력 이 증가하여 전체적인 시스템 감쇠계수가 증가한 때문으로 사료된다.







Fig. 23 Experimental result of wire tension T = 4kgf(D=200mm, K_p =600, V=2m/s, Ta=0.4 s)

4.4 제어 게인에 따른 제어 특성의 변화

Fig. 24와 Fig. 25는 각각 스풀 직경 85 mm, 와이어 주행 속도 2 m/s, 가속 시간 0.4 s, 와이어 장력 2 kgf의 제어 실험 결과를 나타낸다. Fig. 24는 제어 게인 K_p=50, Fig. 25는 제어게인 K_p=200으로 하였을 때의 제어 실험 결과이다. 직경 85 mm의 스풀의 경우 일반적으로 비례 제어 게인을 100 ~ 120 정도로 설정하는 것이 안정적이고 우수한 장력 제어가 수행됨을 예비실험을 통해 알 수 있었다. Fig. 24의 경우에는 상대적으로 낮은 비례 게인을 사용함으로써 가·감속 시간 중에 비교적 큰 오버슈트가 관측되며, 장력 값의 오차를 제거하 는데도 상대적으로 긴 시간이 소요됨을 알 수 있다. Fig. 25는 안정적인 제어가 가능한 비례게인 보다 큰 값을 사용하였을 때 제어 시스템이 진동하는 특성으 로 보여주고 있다. 와이어가 주행하기 이전부터 시스템은 발진하고 있었으며, 와이어 주행 중에도 이러한 진동 특성은 변화가 없음을 알 수 있다. 와이어 주 행 완료 후 일시적으로 진동이 멈춘 것을 볼 수 있지만, 실험 중에 이러한 비 레 게인 값을 지속적으로 유지하는 것은 가능하지 않았다는 것을 알 수 있었 다.







Fig. 25 Experimental result of wire proportional gain K_p = 200 (D=85mm, Ta=0.2s, V=2m/s, T=2 kgf)

4.5 Spool Size에 따른 모터 제어 신호의 변화

Fig. 26은 앞의 4.1절에서 보인 스풀직경 85mm의 장력제어 실험 결과를 다 시 보여주는 그림이며, Fig. 27은 동일한 조건에서 스풀직경 200mm인 경우 제 어 실험의 예이다. 먼저 와이어 이송속도 그래프를 비교해보면 동일한 가·감 속 시간과 동일한 와이어 최대 속도가 지령되었으므로 두 개의 실험에서 전반 적으로 유사한 속도 프로파일을 보여주고 있음을 알 수 있다. 그리고 장력 값 의 변화는 설정값 2kg f를 평균값으로 하면서 상하 고주파의 편차를 보이고 있 으나. 두 실험데이터에서 장력값의 최대 편차값도 ±1kgf를 넘기지 않는 범위 에서 크게 다르지 않은 경향을 보여주고 있다. 두 개의 서로 다른 관성부하에 대해 서로 다른 비례제어 게인 값을 사용하였으므로 장력값 편차 비교는 어느 정도 인위적이라고 볼 수 있으므로 그 가치가 덜 중요할 수도 있다. 한편, 서보 제어기가 모터드라이버로 보낸 전압지령값을 비교해보면, 와이어가 정지중일 경우 스풀 직경 85mm의 와이어에 대해서는 전압지령치는 대략 0.4V 정도이 고, 스풀 직경 200mm의 와이어에 대해서는 전압지령치가 대략 0.8 V 정도 되 고 있음을 볼 수 있다. 이것은 모터의 속도가 0인 경우 모터의 토크만으로 장 력을 발생시킬 경우 스풀 직경이 작으면 상대적으로 작은 토크만으로 동일한 장력을 발생시키는 것이 가능함을 확인시켜준다. 한편 와이어가 주행중에는 일 정한 장력값을 만들어내기 위해 서보제어기의 출력 전압지령치도 변화를 보이 는데, 스풀의 크기에 따라 그 편차가 매우 다름을 볼 수 있다. 스풀 직경 85 mm의 경우 전압 출력의 폭은 1Vpp를 넘지 않음을 볼 수 있지만, 스풀 직경 200mm의 경우 전압 출력의 폭이 5 Vpp를 넘어섬을 확인할 수 있다. 이러한 전 압 출력의 편차는 스풀이 큰 경우 상대적으로 회전관성모멘트가 커지므로 일정 장력 유지를 위한 토크 지령 값이 매우 커짐을 나타낸다. External Roving 방식 의 스풀을 이용한 장력 제어장치에 있어서, 스풀 직경의 점진적인 감소에 따라 시스템의 상태가 매우 달라짐을 본 실험데이터를 통해 확인이 가능하다. 또한, 무거운 스풀을 고속으로 가·감속하기 위해서는 모터의 용랑도 어느 정도 고려 되어야 함을 알 수 있다.



Fig. 26 Experimental result of wire spool size D = 85mm(V=3 m/s, K_p =100, Ts=0.5s, T=2 kgf)



Fig. 27 Experimental result of wire spool size D = 200mm(V=3 m/s, K_p =600, Ts=0.5s, T=2 kgf)

4.6 Spool Size에 따른 제어 특성

Fig. 28은 직경 200 mm의 스풀을 사용하여 제어게인 K_p=400, 장력값 2 kgf, 와이어 주행속도 2 m/s, 가·감속 시간 0.1 s로 제어 실험을 수행한 결 과를 보여준다. 스풀 직경 200 mm는 스풀의 최대직경에 해당하는 값으로, 제 어용 모터에는 비교적 큰 관성 부하로 작용하게 된다. 이러한 조건에서 가·감 속 시간 0.1 s라는 상대적으로 짧은 시간을 주었을 때, 장력 제어 가속중에 큰 오버슈트가 발생함을 볼 수 있다. 이러한 조건에서 와이어를 감속할 경우에는 제어 시스템의 한계를 넘어서는 조건이 발생하여, 와이어 감속 정지 후에 서보 제어기가 에러를 발생시키고 제어 수행을 종료하는 일이 발생하였다.

Fig. 29는 직경 85 mm의 스풀을 사용하여 제어 게인 K_p=120, 제어 장력 4 kgf, 와이어 주행속도 2 m/s, 가·감속 시간 0.071 s의 조건으로 제어를 수행 한 결과이다. 가감속도는 약 28 m/s²에 해당하는 값이다. 스풀의 직경이 작은 경우에는 모터측에 상대적으로 작은 관성 부하가 작용하여 큰 가·감속 지령에 도 시스템 상태 변수가 포화되는 일이 없이 제어가 가능함을 알 수 있다.

따라서 본 실험을 통해 장력 제어기는 와이어 스풀의 변화에 따라 제어 게인 을 다르게 설정하여 연속적이고 안정적인 제어를 수행하여야 할 필요가 있음을 알 수 있었다.



Fig. 28 Failure of control during deceleration due to system variable saturation $(D=200mm, Ta=0.1s, K_p=400, V=2m/s, T=2kq f)$



Fig. 29 Successful control of high acceleration condition with small spool size $(D=85mm, Ta=0.071s, K_p=120, V=2m/s, T=4 \ kgf)$

4.7 Spool Size에 따른 최적 게인의 변화

Fig. 30은 여러 가지 스풀 직경에 대하여 안정적인 제어가 가능한 비례 게인 의 최대치를 실험적으로 측정한 데이터를 표현한 것이다.

그림으로부터 알 수 있듯이 스풀 직경이 클수록 보다 큰 비례 제어 게인 값 이 사용할 수 있음을 알 수 있다. 이는 스풀 직경이 작을수록 관성 부하의 값 이 작아져 큰 비례 게인으로는 쉽게 시스템이 진동할 수 있는 조건이 됨을 의 미한다. 직경이 큰 스풀의 경우 작은 비례 게인 값에서도 발진하지 않는 안정 적인 조건을 얻을 수 있으나, 와이어의 급격한 가·감속을 추종하지 못하므로, 본 연구에서는 스풀 직경의 크기에 따라 비례 제어 게인을 바꾸는 것이 필요함 을 알 수 있다.



Fig. 30 Stable proportional gain vs spool diameter

본 실험을 통하여 Spool Size에 따른 비례 제어 게인 값을 측정하여 Table 3에 나타내 었다.

Spool Diameter	K_p
Ø 93	250
ø 113	330
ø 159	550
Ø 184	700

Table 3 Experimental parameters and conditions

4.8 실시간 Spool 크기 측정 실험

External Roving 와이어를 이용하는 장력 제어장치는 스풀의 직경이 시간이 지남에 따라 점차 감소하므로 제어장치의 관성 부하도 점차 감소하게 된다. 관 성 부하가 감소함에 따라 제어 게인을 조절하지 않을 경우 장력 제어 시스템이 발진하게 되어 사용할 수 없게 된다. 따라서 와인딩 작업 중에 스풀의 크기를 측정하는 것은 고성능 장력 제어장치의 성능 유지에 필수적인 요소이다. Fig. 31은 본 연구에서 개발한 장력 제어 시스템에 있어서 스풀의 크기 측정을 실시 한 결과이다. 여러 가지 다양한 크기의 스풀을 장력기에 장착하고, 와이어를 공 급 방향으로 이송시킨 후 장력기가 자동으로 측정한 결과를 나타낸다. 그림에 서 알 수 있듯이 장력기가 표시하는 현재 스풀의 크기의 평균값은 실제 스풀 크기와 거의 동일하게 측정됨을 알 수 있다. 측정 편차는 대체로 2mm 이내로 나타나지만, 스풀의 크기가 클 경우에는 그보다 큰 편차를 가짐을 볼 수 있다. 이러한 편차가 나타나는 이유는 와이어가 스풀에 감겨있는 형태에 기인하는 것 으로 사료된다. 즉 와이어는 스풀에 트레버스 방식으로 감겨 있는데, 트레버스 가 끝나는 스풀 가장자리에서의 와이어 길이는 스풀의 가운데 부분에서의 길이 와 약간의 편차를 가지고 있게 때문으로 여겨진다.



Fig. 31 Experimental result of spool diameter measurement

제 5 장 결론

수소연료전지차용 고성능 압력용기를 제작하기 위한 와인딩 공법은 제작 시 간이 많이 소요되는 공정이다. 와인딩 공정 시간을 단축하기 위해 와인딩 기계 의 고속화가 필요하지만, 동시에 높은 가·감속이 발생하는 조건에서 섬유의 일정장력을 유지하는 것도 중요한 요소이다. 본 연구에서는 로드셀-센싱바 방 식의 장력 제어장치를 제작하고, 실시간으로 섬유 스풀의 크기를 측정하여 제 어 게인을 자동으로 조절하여 성능을 최적화시키는 적응제어 장력조절장치를 개발하였다. 개발된 장력조절장치를 이용한 평가실험을 통하여 다음과 같은 결 론을 얻을 수 있었다.

 실시간 스풀 직경 측정방법은 실제 스풀 직경을 1~2% 이내의 오차로 측정 할 수 있으며, 적응제어를 수행하기에 충분한 정확도를 가진다.

2. 스풀의 직경에 따른 최적 비례제어 게인 값은 스풀 직경이 작을수록 작아 지는 경향이 있다. 이는 작은 스풀의 경우 관성 부하가 작아서 제어하기 용이 함을 나타낸다.

3. 스풀 직경이 최대값인 경우 제어기 게인을 최적화함으로써 20m/s²의 속도 변화를 추종하는 것이 가능하였으며, 최소 직경 스풀인 경우 순시가속도 28 m/s²의 속도 변화를 추종하는 것으로 확인하였다.

4. 와이어 장력 값이 높을수록 주행 중의 와이어 장력 진동이 감소하여 안정 되는 경향이 있으므로 상대적으로 높은 장력 값을 사용하는 건식 와인딩에 적 용하는 것이 용이하다.

5. 제어기의 비례 게인 값을 스풀의 크기에 맞추어 자동으로 조절하게 하는 적응제어 기법을 사용함으로써, 최대 직경 스풀의 섬유가 완전히 소진될 때까 지 연속적으로 안정적으로 사용하는 것이 가능하다.

감사의 글

항상 마음은 졸업논문을 작성해야 되는데 하면서도 회사 업무가 바쁘다는 핑계로 매 년 미루다 보니 시간만 흘러 갔습니다. 2002년에 입학하여 오늘에서야 논문을 작성하게 되어서 너무나 기쁜 마음으로 감사의 글을 남깁니다.

그동안 많은 도움을 주신 김윤해 교수님께 정말 감사드립니다.

그리고, 복합재료실험실의 한석희씨 및 여러분들에게도 감사드리며, 이 연구를 하는 데 많은 도움을 준 임한석 대표에게도 감사드립니다.

항상 힘이 되어주고 응원해주는 아내에게 고맙다고 전하고 싶습니다.

Reference

- 최창근 2001. *필라멘트 와인딩 공정변수에 대한 연구*. 석사학위논문. 전주: 전북대학교
- 전의진, 이우일, 윤광준, 김태욱, 1995. 최신복합재료. 교학사
- Takashi IMAMURA, Kouhei AKAMINE, Shu HONDA, Kazuhiko TERASHIMA, Hidehiro TAKEMOTO, 2002. MODELING AND TENSION CONTROL OF FILAMENT WINDING PROCESS. IFAC Proceedings Volumes, 35(1), pp.13–18.
- P. Mertiny, F. Ellyin, 2002, .Influence of the filament winding tension on physical and mechanical properties of reinforced composites. Composites: Part A, 33, pp.1615–1622.
- Takashi IMAMURA, Tetsuya KUROIWA, Kazuhiko TERASHIMA, Hidehiro TAKEMOTO, 1999. Design and tension control of filament winding system, IEEE, 2, pp.660–670.
- 이승호, 2003. 필라멘트 와인딩 머신을 위한 장력제어 시스템과 퍼지-PID 장력제어 알고 리즘의 개발. 석사학위논문. 전주: 전북대학교
- Z. Li., 2015. TENSION CONTROL SYSTEM DESIGN OF A FILAMENT WINDING STRUCTURE BASED ON FUZZY NEURAL NETWORK. Engineering Review, 35(1), pp.9–17.
- Yaoyao Shi, Long Yan, Xiaodong He, 2012. Variable tension control for discontinuous tape winding of composites based on constant extension ratio. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 25(5), pp.1022–1028.
- Nikat AKKUS, Garip GENC, Cemal GIRGIN, 2008, CONTROL OF THE PRETENSION IN FILAMENT WINDING PROCESS. acta mechanica et automatica, 2(3), pp.5-10.

Bibilography

- 최서호, 임태원, 2012. 수소 연료전지 자동차. 한국자동차공학회, 34(5), pp.31-38.
- 김도현, 김청균, 이일권, 2012. 복합재료 압력용기의 무게 감소에 관한 연구. 한국가스학 회, pp.144-147.
- 이제명, 김슬기, 김정현, 김명성, 김태욱, 2019. 수소연료의 저장공급을 위한 극저온 기 술 분야. 대한조선학회지, 56(1), pp.15-24.
- 오현철, 2016. 수소저장방식 연구개발을 통한 미래에너지 전환효과. 대한전기협회, 470, pp.44-48.
- 변종익, 임태훈, 김한상, 2017. 실린더 부가 짧은 Type 4 복합재료 압력용기의 설계. 한 국가스학회, pp.31-31.
- 유계형, 김종열, 이택수, 이중희, 2010. 연료전지자동차용 초경량 복합재료 탱크의 수소 충전 특성연구. 대한기계학회, pp.54-59.