

퍼지-PID 알고리즘을 이용한 필라멘트 와인딩 장력제어에 관한 연구

이승호*, 이용재**, 오재윤#

A Study on Filament Winding Tension Control using a Fuzzy-PID Algorithm

Seung-Ho Lee*, Yong-Jae Lee**, Chae-Youn Oh#

ABSTRACT

This thesis develops a fuzzy-PID control algorithm for control the filament winding tension. It is developed by applying classical PID control technique to a fuzzy logic controller. It is composed of a fuzzy-PI controller and a fuzzy-D controller. The fuzzy-PI controller uses error and integrated error as inputs, and the fuzzy-D controller uses derivative of error as input. The fuzzy-PI controller uses Takagi-Sugeno fuzzy inference system, and the fuzzy-D controller uses Mamdani fuzzy inference system. The fuzzy rule base for the fuzzy-PI controller is designed using 19 rules, and the fuzzy rule base for the fuzzy-D controller is designed using 5 rules. A test-bed is set-up for verifying the effectiveness of the developing control algorithm in control the filament winding tension. It is composed of a mandrel, a carriage, a force sensor, a driving roller, nip rollers, a creel, and a real-time control system. Nip rollers apply a vertical force to a filament, and the driving roller drives it. The real-time control system is developed by using MATLAB/xPC Target. First, experiments for showing the inherent problems of an open-loop control scheme in a filament winding are performed. Then, experiments for showing the robustness of the developing fuzzy-PID control algorithm are performed under various working conditions occurring in a filament winding such as mandrel rotating speed change, carriage traversing, spool radius change, and reference input change.

Key Words : Filament winding (필라멘트 와인딩), Fuzzy logic controller (퍼지 로직 제어기), Fuzzy inference system(퍼지 추론법), Driving roller(구동 롤러), Carriage(왕복대), Creel(크릴), Mandrel(맨드럴)

1. 서론

섬유강화 복합재료 제품은 무게에 대한 강도비(비강도, specific strength)와 무게에 대한 탄성율(비강성, specific modulus)이 일반 금속재료 제품에 비

하여 대단히 우수한 특성을 나타내며, 내식성 및 진동, 충격, 피로특성이 강한 장점이 있다.^{1,2} 그래서 최근 섬유강화 복합재료 제품의 수요가 급속도로 증가하고 있다. 섬유 강화 복합재료 제품 제작에 널리 사용되고 있는 필라멘트 와인딩 공정은 수치

* 접수일: 2003년 3월 29일; 게재승인일: 2004년 1월 9일

* 전북대 정밀기계공학과 대학원

** 한국표준과학연구원 질량-힘 그룹

교신저자: 전북대 기계항공시스템공학부, 메카트로닉스 연구센터

Email ohcy@moack.chonbuk.ac.kr Tel: (063) 270-2377

(resin)가 함침(impregnation)된 섬유 스트랜드(strand) 혹은 필라멘트(filament)를 일정한 형상을 가진 맨드렐(mandrel)에 감은 후 열을 가해 경화시켜 복합재료 구조물을 제조하는 공정이다.

필라멘트 와인딩 공정에서 섬유의 장력유지는 복합재료 구조물의 구조적인 강도를 결정짓는 중요한 공정변수이다. 필라멘트의 장력은 섬유강화 복합재료의 물성을 좌우하는 섬유체적율에 가장 큰 영향을 미치는 요소이다.^{3,4} 만약 장력이 설계치 보다 높으면 필라멘트의 체적함유량이 증가하여 제품의 강도는 증가하나 일정 장력 이상에서는 필라멘트의 손상을 초래하며 함침을 위한 수지의 양이 부족하게 되어 경화 시 많은 잔류 응력이 남게된다. 설계된 장력이 유지되지 않으면 성형제품의 치수안정성이 떨어지거나, 기공(void)이 많이 발생하여 응력 집중 현상으로 인한 치명적인 결함을 일으킬 수 있다. 현재 산업현장에서 일반적으로 사용되는 필라멘트 와인딩 머신은 시간에 따라 변화하는 스펀의 직경을 측정하여 이에 상응하는 전류를 스펀(fiber spool)의 축인 크릴(creel)부분에 장착된 브레이크, 클러치, rotating scissor bar, electronic rewinder 등에 부가하여 스펀의 토크를 제어함으로써 스펀에서 풀려나가는 필라멘트의 장력을 조절하는 개루프 제어 방식을 이용하고 있다. 그러나 이와 같은 방법들은 모두 개루프 제어 방법을 사용하므로 시스템에 미치는 외란의 영향을 제거 혹은 축소하기가 불가능하여 필라멘트 와인딩 속도가 크게 변화하는 경우 등에서 장력 변동을 제어하기 어렵다.

본 논문의 목적은 필라멘트 와인딩 공정에서 필라멘트의 장력을 일정하게 유지시켜줄 수 있는 강인한 제어 알고리즘을 개발하는데 있다. 그리고 필라멘트 와인딩을 수행할 수 있는 실험장치를 제작하여 개발된 장력제어알고리즘의 강인성을 검증한다.

2. 장력제어 알고리즘

본 논문에서는 필라멘트의 장력제어를 위해 일반적으로 널리 사용되고 있는 고전 제어기법인 PID 제어기법을 퍼지⁵ 논리 제어에 적용한 퍼지-PID 제어 알고리즘을 개발하였다. 개발된 퍼지-PID 제어기는 기준 입력과 측정된 장력의 오차(e)와 오차의 적분($\int e$) 및 오차의 미분(Δe) 값을 입력 변수로 사용하였다. 이와 같이 입력 변수가 많

은 경우 하나의 퍼지 추론 시스템을 사용하면 퍼지 규칙의 전건부(antecedent) 변수의 개수가 증가하여 제어를 설계하기가 매우 복잡해진다. 따라서 본 논문에서는 Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 오차와 오차의 적분 값을 입력으로 하는 퍼지-PID 제어기와 오차의 미분 값을 입력으로 하는 퍼지-D 제어기로 분리하여 구성하였다. 퍼지 제어기의 출력 변수는 장력제어장치 구동roller에 연결된 AC 서보 모터의 전압(V)으로 하였으며, 퍼지-PID와 퍼지-D 제어기의 출력을 합하여 제어 입력(control value)으로 사용하였다.

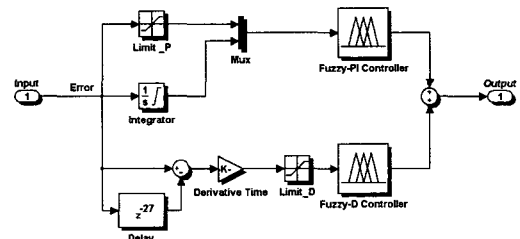


Fig. 1 Block diagram of the Fuzzy-PID control

본 논문에서는 힘 센서를 이용하여 와인딩 할 때 필라멘트의 장력을 측정하였다. 측정된 장력 값에는 많은 고주파 노이즈(high-frequency noise)가 포함되어 있다. 그래서 오차의 미분에 사용되는 미분 시간을 샘플링 시간과 동일하게 하지 않고 Fig. 1의 좌측 하단에 보여주는 것과 같은 블록을 이용하여 샘플링 주기보다 월등히 길게 27sample로 설정하여 미분 시 고주파 노이즈가 증폭되는 현상을 효과적으로 완화시켰다.

입출력 변수가 결정되고 나면 퍼지 분할(fuzzy partition)에 앞서 입출력 공간을 선정해야 한다. 통상적인 와인딩을 수행할 때 필라멘트 장력 범위는 0.45~1.8kgf이므로 기준입력을 1kgf로 설정하였다. 오차에 대한 입력 공간은 실험을 통하여 구한 최대 발생 오차 $\pm 1\text{kgf}$ 의 두 배인 [-2 2]로 선정하였으며, 오차의 적분과 오차의 미분에 대한 입력 공간도 같은 방법으로 하여 각각 [-0.01 0.01]과 [-1 1]로 설정하였다.

퍼지 제어기에서는 입력이 설정된 입력 공간을 벗어나는 경우 출력이 영(zero)이 되어 예기치 못한 결과를 초래할 수 있다. 이러한 현상을 방지하기 위해 오차, 오차의 적분, 오차의 미분이 입력 공간

의 최대, 최소 값을 벗어나는 경우 입력 공간의 최대, 최소 값으로 포화되도록 하였다.

오차와 오차의 적분을 입력으로 받는 퍼지-PI 제어기는 출력 공간을 AC 서보 모터의 전압 범위인 [-10 10]로 설정하였다. 오차의 미분을 입력으로 받는 퍼지-D 제어기는 시스템의 안정성을 향상시키기 위한 목적으로 사용되었기 때문에 PID 제어기에서 사용된 미분이득을 참고로하여 [-1 1]로 설정하였다.

본 논문에서는 먼저 최소의 소속 함수를 이용하여 퍼지 규칙을 설계하였다. 그리고서 실험을 수행하면서 제어알고리즘이 목표로 하는 성능에 가까워질 때까지 점점 소속 함수의 수를 늘려나갔다. Table 1과 Table 2는 본 논문에서 사용된 퍼지-PI와 퍼지-D 제어기의 입출력 변수들의 언어 값을 나타내었다.

Table 1 Linguistic values of inputs and an output in the Fuzzy-PI controller

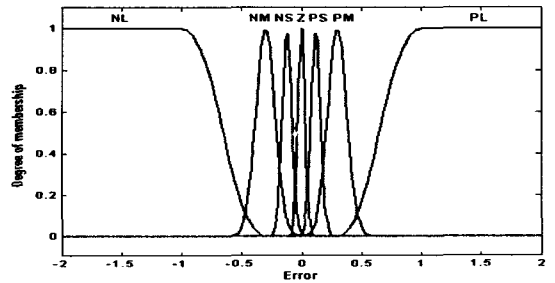
	언어 값
입력 변수 1 (e)	PL(Positive Large), PM(Positive Medium), PS(Positive Small), Z(Zero), NS(Negative Small),NM(Negative Medium), NL(Negative Large)
입력 변수 2 (Σe)	PL(Positive Large), PS(Positive Small), Z(Zero),NS(Negative Small), NL(Negative Large)
출력 변수 (V)	PL(Positive Large), PM(Positive Medium), PS(Positive Small), PVS(Positive Very Small), Z(Zero), NVS(Negative Very Small), NS(Negative Small),NM(Negative Medium), NL(Negative Large)

Table 2 Linguistic values of an input and an output in the Fuzzy-D controller

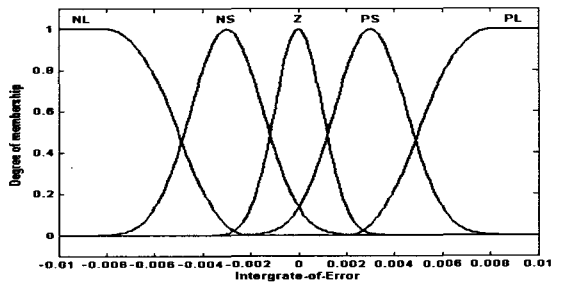
	언어 값
입력 변수 (Δe)	PL(Positive Large), PS(Positive Small), Z(Zero), NS(Negative Small), NL(Negative Large)
출력 변수 (V)	PL(Positive Large), PS(Positive Small), Z(Zero), NS(Negative Small), NL(Negative Large)

퍼지-D 제어기에는 일반적인 Mamdani 추론법⁶을 사용하였다. 비교적 많은 입력 변수와 출력 변수가 가지고 있는 경우 Mamdani 추론법을 사용하면 전건부와 후건부의 인과 관계를 얻기가 힘들며 계산량이 매우 증가하게 된다. 그래서 퍼지-PI 제어기에는 Takagi-Sugeno 추론법^{7,8}을 사용하였다.

본 논문에서는 입출력 변수의 언어 값을 표현하는 소속 함수로 일반적으로 많이 사용되는 가우시안(gaussian) 함수를 주로 사용하였고 입출력 공간의 양단에는 S자 형태 함수와 Z자 형태의 함수를 이용하였다. 퍼지-PI 제어기의 출력 변수는 제어기의 입출력 사이의 인과 관계를 보다 명확히 하기 위해 상수로 표현하였다. Fig. 2와 Fig. 3은 퍼지-PID 제어기의 입출력 공간을 선택된 소속 함수로 퍼지 분할한 모습을 보여준다.



a) Error-input



b) Integrated-error-input

Fig. 2(a) Fuzzy input-and-output spaces of the Fuzzy-PI controller

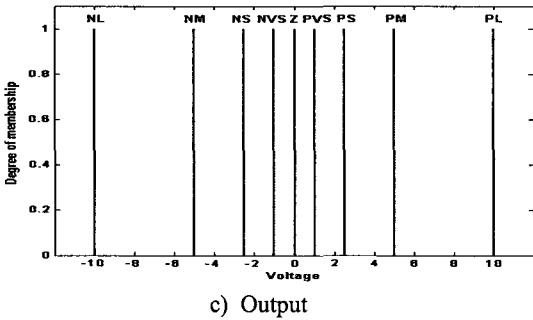


Fig. 2(b) Fuzzy input-and-output spaces of the Fuzzy-PI controller

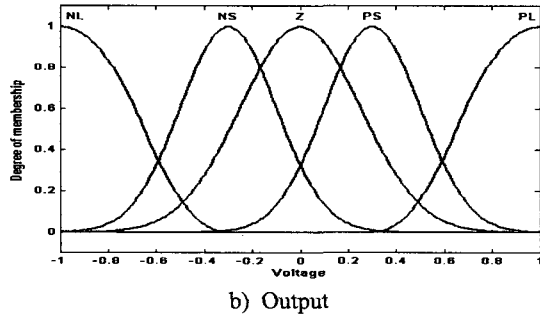
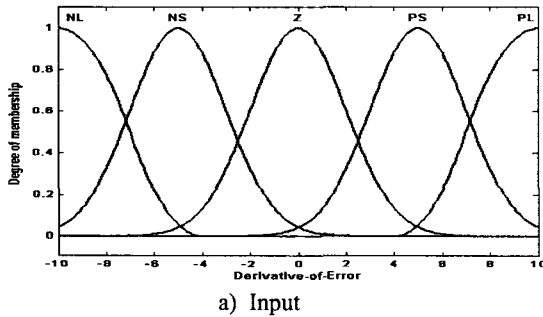


Fig. 3 Fuzzy input-and-output spaces of the Fuzzy-D controller

본 논문에서는 최소의 퍼지 규칙을 정하고 실험을 통하여 퍼지 규칙의 수를 증가시키는 방법을 사용하여 적절한 퍼지 규칙의 수를 결정하였다. 퍼지-PI 제어기에서는 좀더 적은 숫자의 퍼지 규칙으로 효과적인 제어를 수행하기 위하여 오차(e)가 큰 구간에서는 오차만을 가지고 출력을 계산하며 오차가 작은 구간에서는 오차의 적분($\sum e$)과 혼합하여 출력(V)을 계산하였다. Table 3은 퍼지-PI 제어기에 사용된 19가지의 퍼지 규칙을 보여준다.

Table 3 Fuzzy rule base of the Fuzzy-PI controller

		e						
		NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
	NL	NL	NM	NM	NS	NVS	PM	PL
	NS	NL	NM	NS	NVS	Z	PM	PL
	$\sum e$	Z	NL	NM	NVS	Z	PVS	PM
	PS	NL	NM	Z	PVS	PS	PM	PL
	PL	NL	NM	PVS	PS	PM	PM	PL

퍼지-D 제어기의 퍼지 규칙은 5개의 소속 함수를 가지는 오차의 미분(Δe)을 입력으로 사용하고 출력(V)을 5가지 형태의 소속 함수로 하여 출력을 계산하였다. Table 4는 퍼지-D 제어기에 사용된 5가지의 퍼지 규칙을 보여준다.

Table 4 Fuzzy rule base of the Fuzzy-D controller

순서	퍼지 규칙(Fuzzy Rule)
1	If Δe is PL, then V is PL
2	If Δe is PS, then V is PS
3	If Δe is Z, then V is Z
4	If Δe is NS, then V is NS
5	If Δe is NL, then V is NL

3. 실험 장치의 구성

본 논문에서 개발하는 필라멘트 장력 제어 알고리즘의 성능을 검증하기 위한 실험을 수행하였다. 이를 위하여 자신의 축 방향으로 회전하는 원통형 맨드릴(mandrel)과 맨드릴 축과 평행한 방향으로 움직이는 캐리지(carriage) 및 맨드릴 축과 수직방향으로 움직이는 크로스 피더(cross feeder)로 구성되는 Fig. 4와 같은 3축 와인더(3-axis winder)를 제작하였다. 그리고 본 논문에서 개발한 장력제어 알고리즘을 구현하기 위하여 필라멘트에 장력을 발생시킬 수 있는 Fig. 5 같은 장치를 제작하였다.

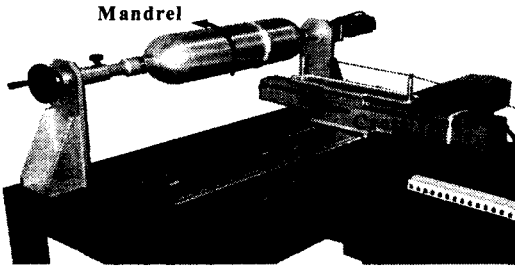


Fig. 4 Photograph of the 3-axis winder

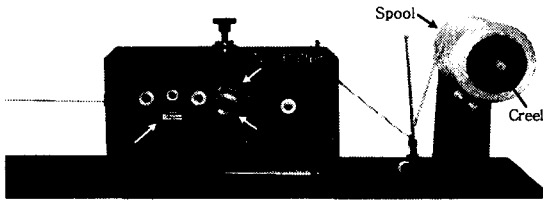


Fig. 5 Photograph of the tension control system

Fig. 5가 보여주듯이 님롤러(nip-roller)는 구동롤러(driving-roller) 위를 지나가는 필라멘트에 수직력을 가하고 구동롤러를 이용하여 필라멘트 장력을 제어할 수 있게 한다. 필라멘트와 구동롤러의 접촉 면적을 넓히기 위하여 두 개의 님롤러를 설치하였다. 그리고 필라멘트의 미끄러짐을 방지하기 위해 구동롤러와 님롤러 표면은 우레탄으로 처리하였다. 구동롤러는 AC 서보 모터에 의해 구동된다. 개발된 제어알고리즘에 따라 AC 서보모터 토크를 제어함으로써 구동롤러는 필라멘트를 잡고 일정한 힘으로 당기거나 혹은 놓아주는 방법으로 필라멘트의 장력을 제어하였다. 이 때 힘 센서는 맨드릴에 감기는 필라멘트 장력을 측정하여 제어 알고리즘에 피드백 시켜준다.

본 논문에서는 MATLAB/xPC Target⁹을 사용하여 윈도우즈 환경에서 실시간 제어시스템 환경을 구성하였다. xPC Target system을 사용하기 위해서는 Host PC와 Target PC가 필요하다. Host PC에서 MATLAB/Simulink와 xPC Target을 이용하여 장력 제어 알고리즘을 설계하고 하드웨어 인터페이스 환경을 구성하여 Target PC로 다운로드 시킨다. Target PC는 다운로드 받은 제어 알고리즘과 하드웨어 인터페이스 환경을 이용하여 Real-Time Kernel 상에서 실시간으로 각 센서 정보를 받아들

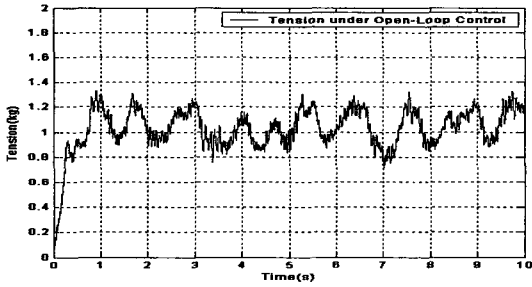
이고 각각의 모터에 제어 명령을 내려 장력제어를 실시간으로 수행한다.

4. 실험 및 고찰

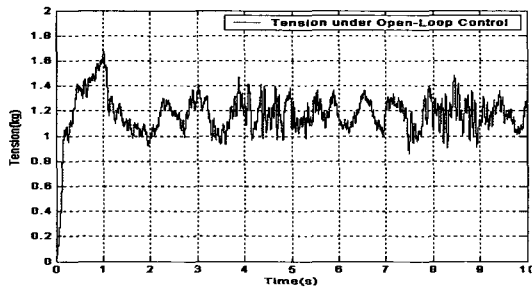
먼저 기존의 개루프(open-loop)제어 방법을 사용하는 장력제어 시스템이 가질 수 있는 문제점을 제시하기 위한 실험을 수행하였다. 본 논문에서는 구동롤러에 연결된 AC 서보 모터에 기준 입력에 해당하는 일정 전압을 부가하여 구동롤러가 항상 일정한 토크를 발휘하여 개루프 장력제어를 수행할 수 있도록 하였다.

Fig. 6은 개루프 제어 방법을 적용하여 실험을 수행한 결과를 보여준다. Fig. 6 a)가 보여주는 바와 같이 맨드릴이 상대적으로 저속으로 회전하는 경우에도 장력이 설정된 기준입력 1kg에서 약 $\pm 0.2\text{kg}$ 의 진폭을 가지고 변화하였다. 이는 크릴에서 일어나는 스틱-슬립(stick-slip) 현상에 의한 장력 변화를 제어 알고리즘이 적절하게 대처하지 못함으로써 발생하였다. 그러나 크릴에 브레이크나 클러치를 설치하여 스펴의 토크를 조절하는 방법으로 장력을 제어하는 개루프 장력제어 시스템에서는 이렇게 큰 장력변동 현상은 발생되지는 않을 것이다. 그러나 Fig. 6 b)가 보여주는 바와 같이 맨드릴이 상대적으로 고속으로 회전하는 경우에는 필라멘트의 장력이 기준 입력보다 약 0.2kg 높은 1.2kg 근처에서 비슷한 진폭으로 변화하였다. 이것은 구동롤러에서 필라멘트를 당기는 힘은 일정하나 맨드릴 회전속도가 빨라짐에 따라 관성이 증가하여 필라멘트의 장력이 증가하는 것을 제어 알고리즘이 잘 대처하지 못하기 때문에 발생한다. Fig. 6 c)는 맨드릴의 회전속도가 일정하지 않고 가감속을 연속적으로 반복하는 경우의 실험결과이다. 이 그림에서 보듯이 필라멘트 장력이 기준입력을 크게 벗어날 뿐 아니라 매우 큰 진폭으로 장력이 변동하였다.

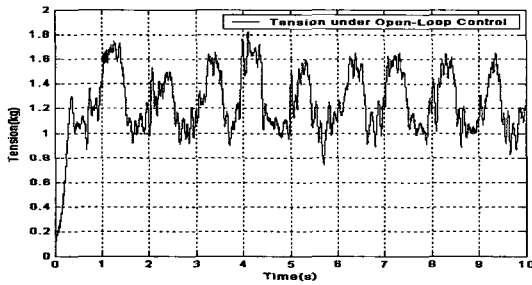
이와 같이 개루프 제어알고리즘을 이용하여 필라멘트 장력을 제어하는 경우에는 좋은 성능을 유지하기가 어렵다. 실제로 크릴에 브레이크나 클러치를 설치하여 스펴의 토크를 조절한다면 장력이 변동하는 진폭을 어느 정도 줄일 수 있을 것이다. 그러나 Fig. 6 b)와 c)에서 보여주는 필라멘트의 장력이 기준장력보다 커지는 현상을 제거하기는 어려울 것이다.



a) mandrel rotation speed : 15rpm



b) mandrel rotation speed : 60rpm

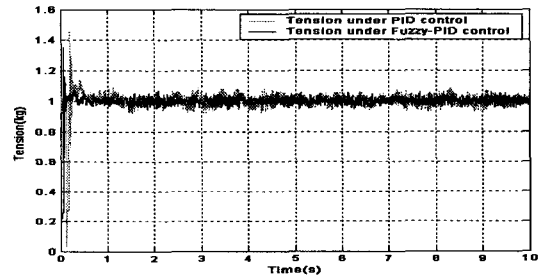


b) mandrel rotation speed : 10~50rpm, 1.0Hz

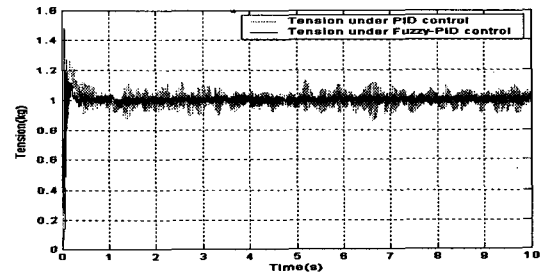
Fig. 6 Winding tension using the open-loop control scheme

개발된 퍼지-PID 제어기의 성능을 평가하기 위하여 여러 조건에서 PID 제어기를 사용한 경우와 비교하는 실험을 수행하였다. PID 제어기와 퍼지-PID 제어기는 모두 동일하게 스펀의 직경이 60~65mm, 기준입력이 1kgf, 맨드릴이 15rpm으로 등속으로 회전하는 상태를 작동조건으로 하여 튜닝되었다. PID 제어기는 비례이득을 5, 적분이득을 100, 미분이득을 0.1로 하였다. 그리고 퍼지-PID 제어기에서와 같이 고주파 노이즈의 영향을 감소시키기 위해 미분 시간을 27sample로 설정하였다.

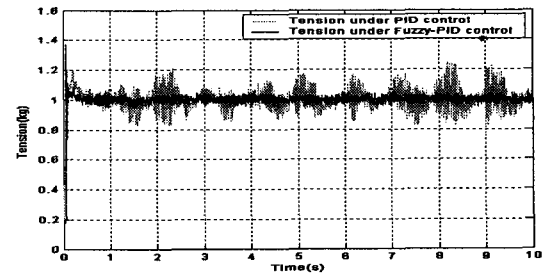
Fig. 7은 스펀의 직경이 60~65mm인 경우 맨드릴의 회전 속도를 변화시키면서 실험을 수행한 결과이다. 개루프 제어 알고리즘을 이용한 결과인 Fig. 6과 비교하여 PID 제어기와 퍼지-PID 제어기 모두 성능이 크게 향상되었음을 알 수 있다. Fig. 7 a)에서 보여주는 바와 같이 맨드릴 회전속도가 일정하면서 비교적 저속인 경우 PID제어기와 퍼지-PID 제어기는 비슷한 성능을 보여주었다. 그러나 Fig. 7 b) 및 c)와 같이 회전속도 일정하면서 상대적으로 고속이거나 맨드릴의 회전속도가 변동하면 PID 제어기를 사용한 경우에는 장력이 크게 변동하였다. 그러나 퍼지-PID 제어기를 사용한 경우에는 맨드릴의 회전속도 변동을 잘 적응하여 기준 장력을 매우 잘 유지하였다.



a) mandrel rotation speed : 15rpm



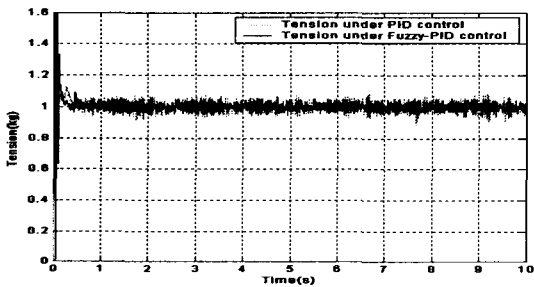
b) mandrel rotation speed : 60rpm



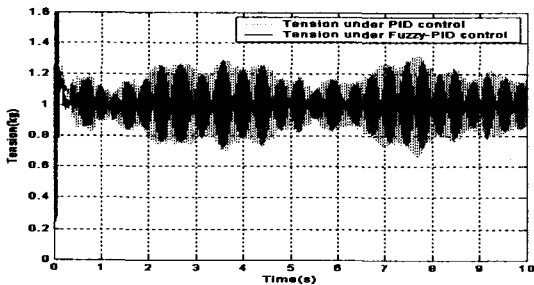
c) mandrel rotation speed : 10~50rpm, 1.0Hz

Fig. 7 Winding tension comparison in a normal operation condition

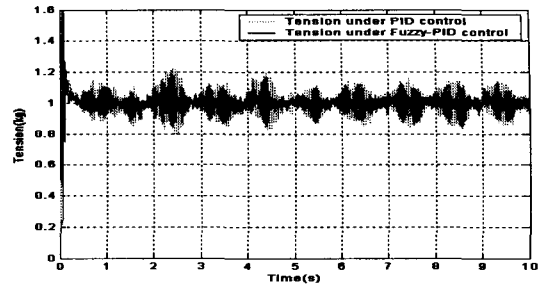
필라멘트 와인딩을 하면 필라멘트가 스펀에서 맨드릴로 이동함에 따라 스펀의 직경과 질량이 감소되어 스펀의 회전관성이 와인딩을 시작할 때에 비하여 크게 작아진다. Fig. 8은 스펀의 직경 감소에 대한 각 제어기의 반응을 관찰하기 위하여 직경이 60~65mm에서 40~45mm으로 감소한 스펀을 사용하여 실험을 수행한 결과를 보여준다. 스펀의 직경이 60~65mm인 경우의 실험결과인 Fig. 7과 비교할 때 PID 제어기는 맨드릴이 회전속도가 일정하면서 저속인 경우는 성능에 큰 변화를 보이지 않았다. 그러나 고속으로 회전하는 경우는 제어기의 성능이 크게 떨어졌다. Fig. 8이 보여주는 바와 같이 퍼지-PID 제어기의 경우는 스펀의 직경 변화에 잘 적응하기 때문에 맨드릴의 회전속도에 관계없이 기준장력을 잘 유지하고 있음을 알 수 있다.



a) mandrel rotation speed : 15rpm



b) mandrel rotation speed : 60rpm



c) mandrel rotation speed : 10~50rpm, 1.0Hz
Fig. 8 Winding tension comparison with a reduced spool radius

지금까지의 실험결과는 기준장력을 1.0kgf으로 하였을 경우이었다. Fig. 9는 기준입력을 0.5kgf, 1.5kgf으로 변화시켰을 경우의 퍼지-PID 제어기의 응답을 보여준다. Fig. 9가 보여주는 바와 같이 퍼지-PID 제어기는 기준입력이 1kgf인 작동조건에서 튜닝 되었음에도 불구하고 기준입력의 변화에 잘 적응하고 있음을 알 수 있다.

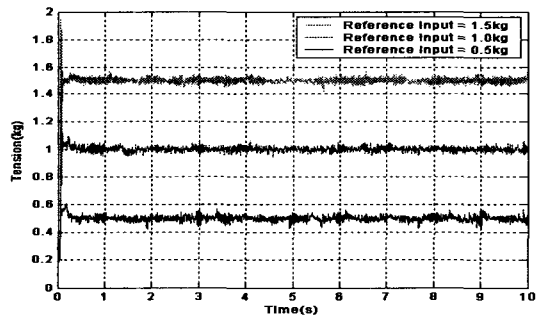


Fig. 9 Winding tension with various reference inputs

Carriage가 좌우로 움직임에 따라 맨드릴에 필라멘트가 감기는 지점과 구동롤러 사이의 거리가 일정하지 않고 변화한다. 이로 인하여 맨드릴과 구동롤러 사이의 거리 및 와인딩 속도가 변화하며, 이것은 필라멘트의 장력을 변화시키는 하나의 외란으로 작용한다. Fig. 10은 이러한 조건이 퍼지-PID제어기의 성능에 미치는 영향을 알아보기 위해서 Carriage를 3초간 100mm/s 속도로 전진시키고 2초간 정지하였다가 다시 3초간 같은 속도로 후진하는 방법으로 동작시키는 실험을 수행한 결과를 보여준다. 이 그림이 보여주는 바와 같이 퍼지-PID 제

어기는 이와 같은 외란에도 잘 적응하여 Carriage가 움직이지 않는 경우의 시험결과인 Fig. 8 c)와 거의 유사한 결과를 보여주었다.

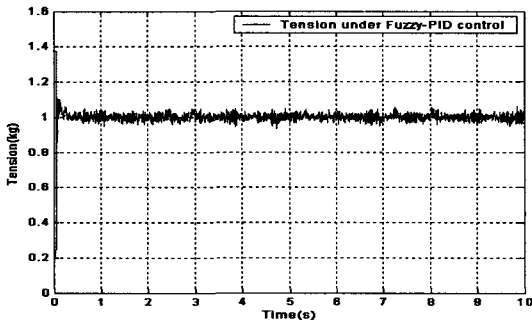


Fig. 10 Winding tension in case of moving the carriage

5. 결론

본 논문에서는 필라멘트 와인딩 장력을 제어하기 위한 퍼지 논리 제어기(fuzzy logic controller)에 PID 제어방법을 적용하여 퍼지-PID 제어 알고리즘을 개발하였다. 퍼지-PID 제어알고리즘은 오차와 오차의 적분 값을 입력으로 하는 퍼지-PI 제어기와 오차의 미분 값을 입력으로 하는 퍼지-D 제어기로 분리하여 구성하였다. 퍼지-PI 제어기에는 Tagaki-Sugeno 추론법을 사용하였고, 퍼지-D 제어기에는 Mamdani 추론법을 사용하였다. 그리고 퍼지-PI 제어기는 19개의 퍼지규칙을 사용하였고, 퍼지-D 제어기는 5개의 퍼지규칙을 사용하였다. 본 논문에서 개발한 장력 제어알고리즘의 성능을 검증하기 위하여 와인더와 장력제어장치 및 MATLAB/xPC Target을 이용한 실시간 제어시스템으로 구성되는 실험장치를 제작하였다. 먼저, 기존의 개루프 제어알고리즘이 장력제어에 가질 수 있는 문제점을 제시하기 위한 실험을 수행하여 폐루프 제어방식의 필요성을 보여주었다. 그리고 개발한 퍼지-PID 제어알고리즘의 강인성을 보여주기 위하여 여러 조건에서 실험을 수행하였다. 실험조건으로는 맨드릴의 회전 속도의 변동, 스펀 직경의 변동, 기준 장력의 변동, carriage의 이송 등과 같은 실제 필라멘트 와인딩에서 발생할 수 있는 상황들을 고려하였다. 본 논문에서 개발한 퍼지-PID 제어알고리즘은 이와 같은 모든 실험 조건들에서 원하는 기준 입력을 매우 잘 추종하는 우수한 강인성을 보여주었다.

참고문헌

1. Rosato, D.V. and JR. Grove, C.S., "Filament winding : its development, manufacture, applications, and design," a division of John Wiley & sons, Inc., pp. 1-3, 1964.
2. Peters, S.T. and Humphrey, W.D., Foral, R.F., "Fiament winding composite structure fabrication," SAMPE®, pp. 1-11, 1991.
3. Hung, J.h. and White, H.V., "Precision Winding of Fiber Optic Filament-Part 1: Winding Characteristics," IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 39, No. 3, pp. 259-267, 1992
4. Hung, J.h. and White, H.V., "Precision Winding of Fiber Optic Filament-Part 2: Winding Control," IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 39, No. 4, pp. 313-322, 1992
5. Zadeh, L.A., "Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes," IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 3, No. 1, pp. 28-44, 1973.
6. Mamdani, E.H., "Application of fuzzy algorithm for control of simple dynamic plant," Proc. IEE, Vol. 12, pp. 1585-1588, 1974.
7. Takagi, T. and Sugeno, M., "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control," IEEE SMC., Vol. 15, No. 1, pp. 116-132, 1985.
8. Kim, Y.T., "Independent Joint Adaptive Control of Robot Manipulator Using the Sugeno-type of Fuzzy Logic," Journal of the Korean Society of Precision Engineering. Vol. 20, No. 6, pp. 55-56, Jun. 2003.
9. The Mathworks, "xPC Target for Use with Real-Time Workshop," The Mathworks, Inc., pp. 1-12, 2000.