

◆특집◆ 섬유기계

자동고속분사기의 정밀 장력제어 시스템 개발

정병목*, 이성건**, 안홍태***, 박무진**, 신찬배****

Development of Precise Tension Control System for Automatic High Speed Splitting Machine

Byeong-Mook Chung*, Sung-Gun Lee**, Hong-Tae Ahn***, Moo-Jin Park**, and Chan-Bai Shin****

Key Words : Splitting machine (분사기), Tension of yarn (실의 장력), Tension control (장력제어), Fuzzy control (퍼지제어)

1. 서론

일반적으로 섬유를 재직할 때 絲가 받는 장력이 섬유의 품질을 좌우하게 된다. 특히, 산업용 섬유에 있어서는 더욱 중요한 부분으로 여겨지고 있다. 산업용 섬유의 경우 그 조직은 간단하지만 絲가 워낙 가는 mono 絲로 이루어져 있어 보편적인 섬유 현장 이론과 섬유 기계로서는 제품 생산이 무척 까다롭고 어렵다. 왜냐하면 국내 대부분의 섬유기계가 의류용으로 개발되어 있어 정밀한 장력 관리를 요하는 산업용 섬유를 생산하는 업체의 현실에는 맞지 않기 때문이다. 특히 가장 중요한 원자재인 원사 수급의 경우 기술적 문제가 심각한데 이는 산업용 섬유에 대한 국내의 낮은 이해 수준과, 질보다는 양 중심의 섬유 산업구조에 기인한다고 볼 수 있다. 현재 국내의 대표적인 원사 메이커들은 100% 폴리에스테르의 SD 絲를 생산하는데, 생산성의 문제로 인해 10가닥 이상을 동시에 하나의 롤에 감은 분섬사(分纖絲) 형태로 생산하고 있다. 이로 인해

원섬사를 구입한 제직 공장에서는 이를 한 가닥씩 모노(Mono) 絲로 분리해 사용해야 한다. 일반 의류용 직물과는 달리 직경 100 μ m 이내인 모노 絲를 사용하는 첨단 산업용 섬유의 경우 그 품질은 원사에서 실을 분사할 때 발생하는 실의 장력에 큰 영향을 받는다^[1]. 지금까지 국내에서 사용하고 있는 분사기는 구조적으로 장력에 의해 실을 분사하는 원리로 되어있어 직경이 굵은 일반 의류용 섬유를 생산하기에는 별 문제가 없으나 직경이 가는 첨단 산업용 섬유를 분사할 때에는 실의 장력 변화에 따라 실이 늘어나면서 직경이 줄어들므로 섬유의 품질에 큰 영향을 끼치고 있다. 이것은 현재의 의류용 분사기는 실을 감는 부분에만 모터를 부착하여 실의 장력에 의해 원사의 실이 풀어지도록 되어 있어서 어느 정도의 장력이 걸리지 않으면 실이 풀어질 수 없는 구조적인 문제를 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 장력을 능동적으로 낮게 제어하기 위하여 원사가 장력에 의해 풀어지는 것이 아니라 추가로 설치한 모터에 의해 풀어지는 구조로 설계를 변경하였고 전자적 장력 센서를 이용하여 장력에 따라 회전 속도를 늘이거나 줄이므로써 장력을 일정하게 유지할 수 있다^[2-4]. 그 결과 분사 공정에서의 장력이

* 영남대학교 기계공학부

Tel. 053-810-2569

Email bmchung@yu.ac.kr

** 영남대학교 대학원

*** (주) 세진

**** 울산과학기술대학교 기계학부

현저히 낮아졌을 뿐만 아니라 장력의 변화도 작기 때문에 고품질의 첨단산업용 섬유를 생산하는 분사기의 개발이 가능했다.

처럼 고속으로 분사하는 실에 걸리는 장력은 데니어 당 약 0.9~1.2g이며 산업용 섬유에서는 0.3g이하로 유지할 필요가 있다.

2. 분사기의 구조와 기능

기존의 분사기(Splitting M/C)는 絲를 나누어 보빈에 와인딩 할 때 분사기 자체가 안고 있는 구조적 문제점으로 인해 다른 섬유기계의 장력과 비교해도 4~6 배 이상의 큰 장력이 걸리고 있다. 따라서 첨단 산업용 뿐만 아니라 고급 의류용 섬유를 분섬사하는 데에도 문제가 있다는 지적을 받고 있다. 이렇듯 기존의 분사기에서 나누어진 분섬사(分纖絲)는 고장력 때문에 무리한 스트레스를 받거나, 일정하지 못한 장력 관리 때문에 실의 굵기가 변하는 등의 문제를 안고 있다. 이를 사용하는 업체에서는 고 장력으로 인한 스트레스를 풀기하기 위해 불필요한 다른 준비 공정(연사 따위)을 하거나, 혹은 다른 여러 가지 방법을 사용하여 실에 남아 있는 잔류응력을 제거하지 않으면 안 되는 현실에 놓여 있다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 기존의 분사기는 보통 12kg이나 되는 원사(original yarn) 케익의 실을 매우 높은 장력으로 풀어주고 있다. 10가닥이 넘는 원사는 장력센서를 지나 리버스판(reverse plate)에서 한 가닥씩 나뉘어져 보빈(bobbin)에 감긴다. 리버스 판의 역할은 보빈에 감은 실이 쓰러지지 않게 사다리꼴 형태로 적층되도록 유도한다. 각각의 보빈은 벨트에 의해 모터와 연결되어 있으므로 모터가 회전하면 보빈도 회전하게 되므로 실을 당기게 된다. 실의 장력이 증가하면 장력스프링을 당기게 되고 이로 인해 브레이크 드럼의 회전이 자유롭게 되는데 장력이 걸리지 않으면 장력스프링은 브레이크 드럼의 회전을 막아 장력을 높이는 역할을 한다. Fig. 2는 기계적 브레이크의 작동원리를 보여주고 있는데 원사 케익이 너무 빨리 회전하여 장력이 낮아지면 브레이크를 동작시켜 원사 케익의 회전을 억제하여 실이 과도하게 풀리는 것을 방지한다. 그리고 모터의 회전수가 일정해 보빈이 일정한 속도로 회전하는 경우에도 시간이 지남에 따라 보빈의 반경은 늘어나기 때문에 분사 실의 선속도가 증가할 뿐만 아니라 원사의 반경은 줄어들므로 인해 원사 케익의 회전속도는 초기에 600rpm에서 2500rpm까지 증가한다. 이때 평균 선속도는 12m/s이며 450,000m를 분사하는데 걸리는 시간이 약 10.5시간이다. 이

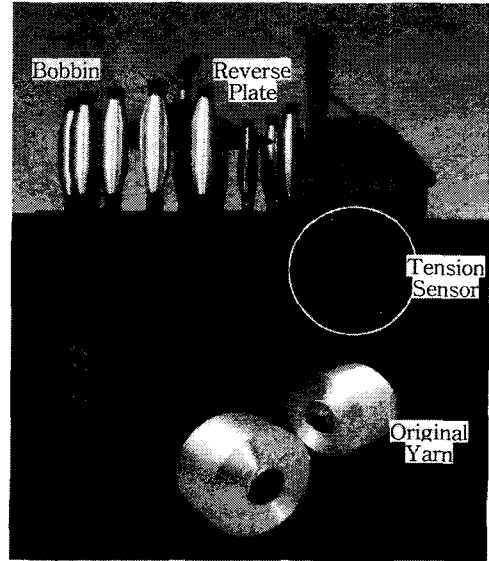


Fig. 1 Traditional Splitting machine

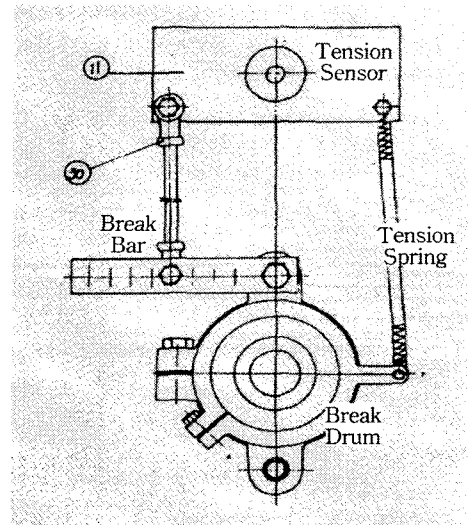


Fig. 2 Tension control breaker of general splitting machine

3. 능동 장력 제어 시스템

본 연구에서는 기존 분사기가 갖고 있는 고 장력과 불균일한 장력 편차 문제를 해결하기 위해 능동제어 방식으로 장력을 제어하는 분사기를 개발하였다. 이 경우 실을 푸는 쪽과 감는 쪽에 두개의 모터를 설치하게 되는데 감는쪽의 속도에 맞추어 푸는쪽의 속도를 조절해 줘야 한다. 그러나 문제는 이러한 속도 동기화가 잠깐 동안이라도 이루어지지 않으면 실이 끊어져 버리므로 더 이상의 제어가 불가능하다는 점이다. 따라서 Fig. 3에서와 같이 장력추(tension bar)를 두어 약간의 속도차이로는 실이 끊어지지 않도록 버퍼(buffer)를 두었다. 그러나 이 장력추가 감당할 수 있는 길이의 차이는 최대 $\pm 0.3m$ 로서 실의 평균 속도가 $12m/s$ 라는 점을 감안하면 제어 여유가 0.025초 밖에 되지 않는다. 이 장력 센서의 각도는 각도센서(potentiometer)를 이용하여 측정했고 항상 일정한 각도를 유지하도록 원사 케익의 회전축에 설치한 모터를 제어하였다. 즉, 장력이 약하면 원사 케익의 푸는 속도를 줄이고 장력이 강하면 속도를 늘이는 것이다. Fig. 4는 장력을 측정하는 포텐쇼미터와 속도를 제어하는 능동제어 모터를 보여 준다. Fig. 5는 실의 사속을 측정하는 엔코더와 분사지그를 보여주는데 분사지그를 설치한 것은 실의 장력이 너무 낮아짐으로

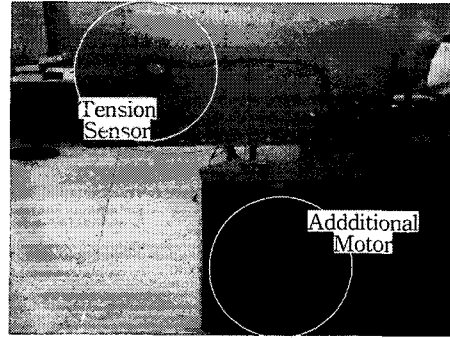


Fig. 4 Active control motor

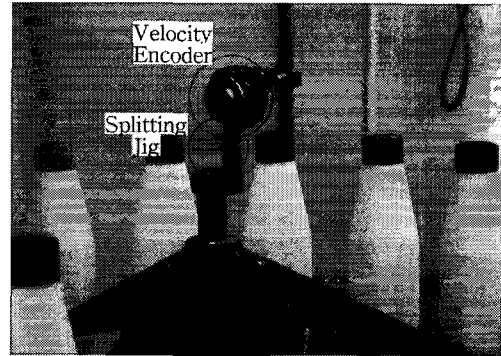


Fig. 5 Splitting jig & velocity sensor

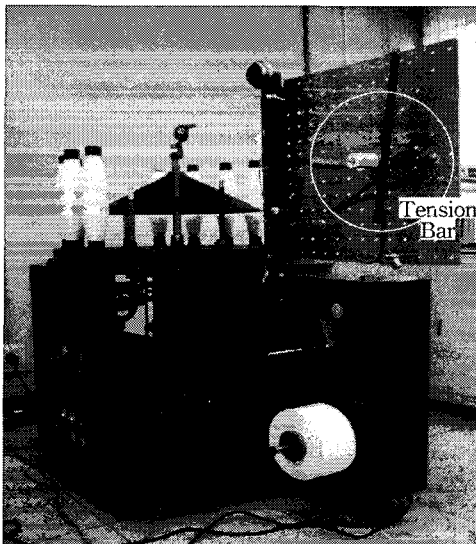


Fig. 3 Splitting machine with tension control system

인해 10가닥의 실이 잘 나누어지지 않고 장력이 센 쪽으로 빨려 들어가는 현상이 생기게 되어 이를 방지하기 위해 둔 것이다. 이것은 고리형의 세라믹 가이드로서 두 개를 한 쌍으로 설치한 이유는 겹쳐진 두 가닥의 실을 나눌 때 분리력은 장력과 사잇각의 사인 값에 비례하므로 장력을 줄였기 때문에 사잇각을 크게 하기 위함이다. 따라서 10 가닥을 두 개의 가이드에 대해 지그재그로 나누면 사잇각이 거의 90° 가깝게 유지될 수 있었다.

4. 퍼지 PID 제어

4.1 PID 제어

본 논문의 장력제어 시스템에서 원사 케익은 DC 서보 모터에 의해 회전하며 제어 입력은 이 모터의 서보 드라이브에 인가되는 DC 전압이다. Fig. 6의 제어기 블록선도와 관련하여 살펴보면 기준입력이 장력

센서의 기준값이고 출력은 장력 센서의 측정값이다. 이 두 값의 차이가 에러인데 만일 에러가 제로라면 현재의 모터 속도가 사속과 일치한다는 뜻이고 따라서 모터의 속도를 달리 변화시킬 필요가 없다. 그러나 장력이 더 세거나 약하면 이에 비례하여 다음과 같이 모터의 속도를 변화시켜야 한다.

$$\Delta u = K_p e + K_D \frac{de}{dt} + K_I \int e dt \quad (1)$$

여기서 K_p 는 비례제어 게인이고, K_D 는 미분제어 게인, 그리고 K_I 는 적분제어 게인이다.

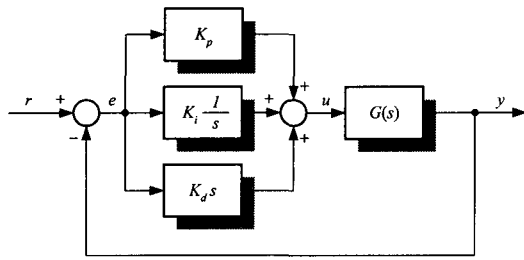


Fig. 6 PID controller

그러나 앞에서 언급한 바와 같이 분사시간 10시간 동안에 모터의 속도는 600rpm에서 2500rpm까지 변하기 때문에 저속에서 어렵게 조정된 PID 게인 값은 속도가 올라감에 따라 더 이상 적용되지 않았다. 또한 장력변화를 흡수할 수 있는 장력추의 이동범위가 극히 제한되어 있으므로 $\pm 10cm$ 이상을 벗어나면 제어 입력을 크게 변화시켜 실이 끊어지는 최악의 상황을 막아야 한다. 따라서 단순한 PID제어로는 장력제어를 구현하기 어렵다.

4.2 퍼지 PID 제어

퍼지 제어기란 시스템의 입력과 출력의 애매한 관계를 인간의 경험과 지식을 기초로 한 언어적 제어규칙으로 표현하여 이를 제어 원리로 변환시킨 것이다. 따라서 모터의 속도를 고려한 PID 제어 식(1)을 퍼지 PID 제어기로 나타내면 다음과 같다^[5,6].

$$\Delta u = F[v, e, \frac{de}{dt}, \int e dt] \quad (2)$$

여기서 v 는 모터의 속도이고 F 는 퍼지로직을 나타낸다. 이것의 의미는 j 번째 제어규칙 R_j 이

$$\begin{aligned} R_j &= V_j(v) \wedge E_j(e) \rightarrow K_p = k_{p,j} \\ & \quad K_D = k_{D,j} \\ & \quad K_I = k_{I,j} \end{aligned} \quad (3)$$

$(j = 1, 2, \dots, M)$

일 때, 여기서 M 은 전체 규칙의 개수이다. 이때 멤버쉽 함수의 값을 μ 라 할 때, 규칙의 적합도(fitness) ϕ_j 는

$$\phi_j = \frac{\mu_{V_j(v)} \wedge \mu_{E_j(e)}}{\sum_{i=1}^M \mu_{V_i(v)} \wedge \mu_{E_i(e)}} \quad (4)$$

으로 구할 수 있다. 따라서 퍼지 추론에 의한 PID 제어 게인의 값은

$$\begin{aligned} K_p &= \sum_{j=1}^M \phi_j \times k_{p,j} \\ K_D &= \sum_{j=1}^M \phi_j \times k_{D,j} \\ K_I &= \sum_{j=1}^M \phi_j \times k_{I,j} \end{aligned} \quad (5)$$

이므로 이 게인 값을 식(1)에 적용하면 식(2)의 퍼지 PID를 구현한 것이 된다.

본 논문에서는 구동 모터의 속도와 장력의 에러에 따라 D 게인과 P 게인에 대한 규칙을 Table 1과 같이 찾아내었고 모든 멤버쉽 함수는 사다리꼴 형태를 사용하였다. 장력오차에 대해서는 $\pm 10cm$ 를 기준으로 Positive, Zero, Negative의 세부분으로 나누었고 모터 속도에 대해서는 RPM 기준으로 750, 1000, 1500을 기준으로 네 부분으로 나누어 1500이상을 VB(very big)로 1000에서 1500사이를 B(big)로 750에서 1000사이를 M(medium)으로 750이하를 S(small)로 나타내었다.

Table 1 Proposed fuzzy rules

		장력오차		
		Negative	Zero	Positive
모터 속도	VB	$K_D=0.07$ $K_P=0.008$	$K_D=0.07$ $K_P=0.004$	$K_D=0.035$ $K_P=0.004$
	B	$K_D=0.03$ $K_P=0.01$	$K_D=0.03$ $K_P=0.005$	$K_D=0.015$ $K_P=0.005$
	M	$K_D=0.015$ $K_P=0.015$	$K_D=0.015$ $K_P=0.008$	$K_D=0.008$ $K_P=0.008$
	S	$K_D=0.01$ $K_P=0.026$	$K_D=0.01$ $K_P=0.013$	$K_D=0.005$ $K_P=0.013$

5. 실험 결과

5.1 시간에 따른 모터 속도와 장력의 변화

개발된 고속 분사기를 이용하여 분사를 해 본 결과 Fig. 7에서 보는 것처럼 원사 케이크의 구동모터가 최고 2500rpm까지 도달하였고 전체 시간이 10시간 걸렸다. 기존 분사기에서는 약 10시간 30분 정도 소요되던 분사시간이 10시간으로 감소한 이유는 모터에 의해 실의 장력이 능동 제어되어 실의 장력이 떨어진 관계로 그만큼 실이 늘어나지 않아 30분 정도의 분사시간이 단축된 것으로 보인다. 그리고 뒷부분에서 속도가 급격히 상승하는 이유는 분사되어 감기는 보빈은 계속 굽어지는 반면 풀어주는 모터부분의 원사 케이크의 반경이 줄어들어 모터의 회전수가 급격히 증가함을 알 수 있다. Fig. 8은 Fig. 7에서 초기의 100초 동안 모터의 회전수 변화를 확대해 살펴본 것으로 전체 10시간 중 초기의 25초를 제외하고는 모터의 회전이 안정을 유지함을 알 수 있다.

Fig. 9는 장력 센서에서 검출하는 각도 변화 즉, 분사 전 10가닥의 장력의 크기를 나타내는데 처음부터 끝까지 10시간동안 장력이 일정하게 유지되고 있음을 알 수 있다. 그리고 Fig. 10은 초기 100초 동안의 장력변화를 확대한 것인데 이 역시 처음 25초간은 장력변화가 크지만 그 후로는 80초의 가속 구간동안 양(positive)의 장력을 유지하다가 650rpm에 이르러서는 속도와 장력이 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 실제 포텐쇼미터로 측정한 장력 값은

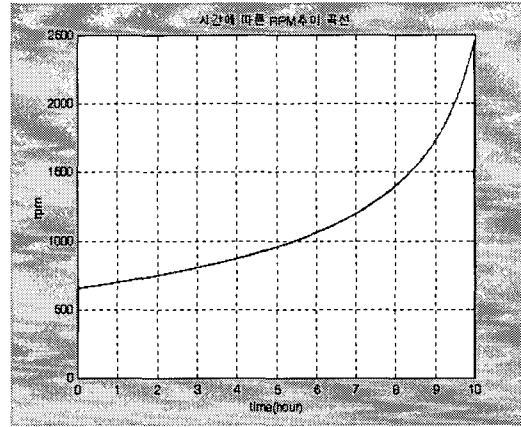


Fig. 7 Change of motor velocity

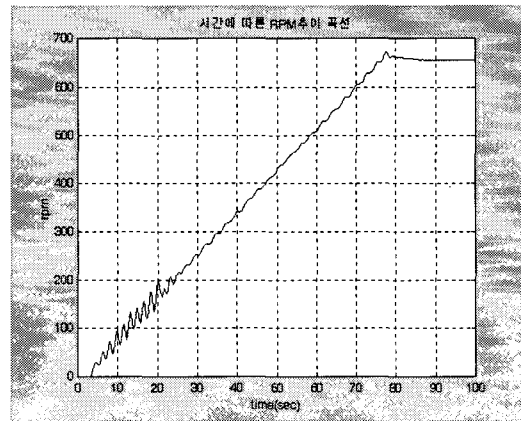


Fig. 8 Enlarged part for Fig. 7

아날로그 값으로 많은 노이즈가 섞여 있다. 따라서 5개의 측정 데이터를 이동평균(moving aberage)하여 구했다.

5.2 데니어당 장력 편차

분사시 앞에서 살펴본 것처럼 80초 후 정상상태에 돌입함을 알았다. 정상상태 돌입후 각 絲에 걸리는 데니어당 장력의 분포를 살펴보면 Fig. 11처럼 기존 분사기에서의 장력은 데니어당 1g이 초과함을 볼 수 있었고, 이때 장력편차도 0.01g으로 흔들리고 있음을 알 수 있다. 또한, 전체 장력의 분포를 보면 주기적으로 흔들림을 볼 수 있는데 이는 분사시 보빈에 絲를 감을 때 아래위로 트래버싱함

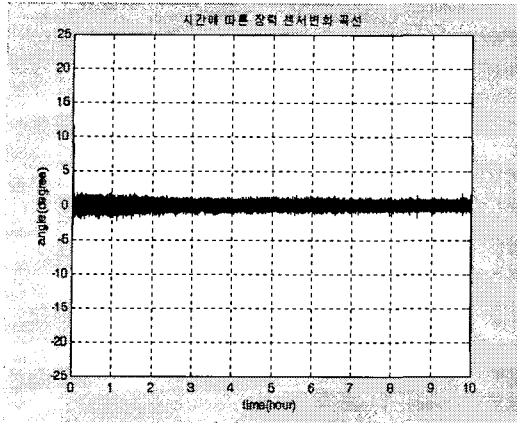


Fig. 9 Change of tension sensor

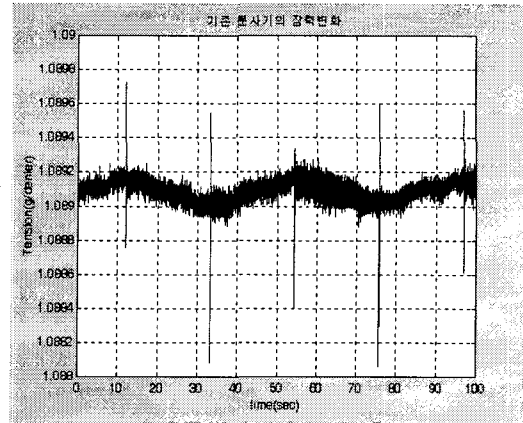


Fig. 11 Tension distribution of general splitting machine

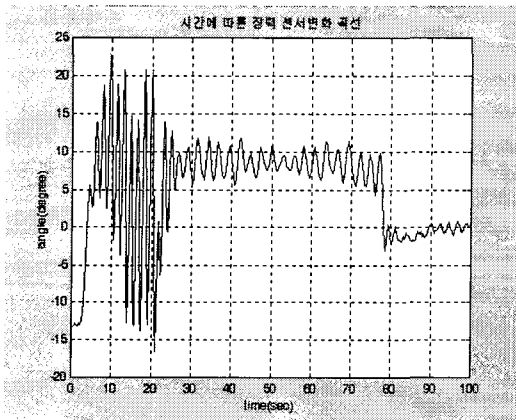


Fig. 10 Enlarged part for Fig. 9

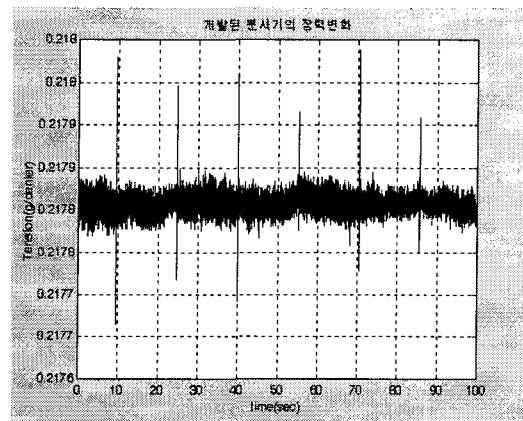


Fig. 12 Tension distribution of splitting m/c with tension control system

으로 생기는 실 길이의 변화에 따른 장력 변화량이다. 그러나, 본 연구에서 개발한 정밀 장력제어 시스템을 부착한 분사기는 Fig. 12에서 보듯 장력편차가 거의 10배나 줄어든 0.001g을 나타내고 있고 저장력 목표인 0.3g아래인 0.217g을 유지하고 있다. 물론 분사시 보빈에 絲를 감을 때 트레이싱함으로 생기는 장력 편차 역시 거의 없어짐을 볼 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 絲가 늘어나지 않는 저 장력 상태에서 분사가 가능하고, 분사시 絲의 장력 편차를 줄여 첨단 산업용 섬유나 고품질의 섬유를 생산할 수 있는 자동 고속분사기용 정밀장력 제어 시스템

을 개발하였다. 앞의 결과에서 보듯이 개발된 정밀 제어 시스템이 부착된 분사기는 저장력인 테니어당 0.217g을 유지하고 있으며 장력 편차 역시 기존 분사기에 비해 0.1배로 줄어들어 고품질의 섬유 생산을 가능하게 했다.

분섬사의 품질 문제가 해결됨에 따라 원사 메이커들의 자신있는 외국 진출이 가능할 것으로 기대되며 이러한 수출 증가는 월 1000톤 이상의 규모로써 分絲업계에 큰 호기로 작용할 것으로 기대된다. 또한, 고정밀 장력제어 분사기의 개발은 분사된 실을 가지고 바로 정경을 통한 제직으로 이어짐에 따라 8~10일 걸리던 연사 공정과 이를 위한 사전 와

인딩 공정, 그리고 스틱세팅 공정을 없앴으로써 Loss절감, 인건비절감, 생산성 향상 등 30~40%의 원가절감을 이룰 수 있을 것으로 기대된다. 뿐만 아니라 경·위사를 동일한 물성의 원사로써 메쉬를 생산함에 따라 현격한 품질 향상을 이룰 것으로 기대되어 가격과 더불어 품질에서도 우위의 경쟁력을 가질 수 있게 될 것이다. 그리고 이러한 장력 제어 기술은 금속 와이어나 필름의 와인딩 분야에서도 적용이 가능하므로 섬유 이외의 산업분야에서도 응용할 수 있다.

참고문헌

1. 권오정, "텍스타일 디자인의 이론과 실제," 미진사, 1997.
2. S.H Song and S.K Sul, "A new tension controller for continuous strip processing line," IEEE Trans. on Industry Applications. Vol. 36, No. 2, pp. 633-639, 2000.
3. K.H. Shin and W.K. Hong, "Real-time tension control in a multi-stand rolling system," KSME Inter. Journal, Vol. 12, No. 1, pp. 12-21, 1998.
4. F.L Luo and C.Y. Wen, "Multi-page mapping artificial neural network algorithm used for constant tension control," Expert systems with Applications, Vol. 13, No. 4, pp. 307-315, 1997
5. B.M. Chung and J.H. Oh, "Control of dynamic systems using fuzzy learning algorithm," Fuzzy sets and systems, Vol. 59, No. 1, pp. 1-14, 1993.
6. B.M. Chung, Y. Sheng, and M. Tomizuka "Fuzzy Logic Modeling and Control for Drilling of Composite Laminate : Simulation," International Journal of KSPE, Vol. 2, No. 1, pp. 11-17, 2001.