한국정밀공학회지 제20권 제3호 (2003년 3월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 20, No. 3, March 2003.

디그레시브 펀 권사(Degressive Pirn Winding)를 위한 기구학적 권사 제어 알고리듬에 관한 연구

최영휴*, 정원지*, 김광영**

A Study on the Kinematic Winding Control Algorithm for Degressive Pirn Winding

Young-Hyu Choi*, Won-Jee Chung* and Kwang-Young Kim**

ABSTRACT

Direct motor-driven winding has been increasingly applied in winding machinery. However, it is necessary to analyze the kinematics of winding prior to developing the winding control algorithm, because direct motor-driven winding machine should be operated in accordance with the pre-determined kinematic information for the winding control. This paper presents the kinematics of the degressive winding method and its kinematic winding control algorithm in order to wind the required volume of a pirn package in a desired shape. The proposed algorithm can give the appropriate yarn speed, traverse speed, and the spin speed of the spindle at every traverse stroke, which are utilized for controlling the spindle motor and traverse motor of the winding machine. Computer winding simulations showed that the proposed algorithm is successful in the degressive pirn winding.

Key Words : Kinematic winding control(기구학적 권사 제어), Degressive winding pirn(디그레시브 권사), Yarn speed(絲速), Traverse speed(트레버스 속도), Computer simulation(컴퓨터 모사)

기호설명

A = nominal sectional area of fiber (m^2)
CD = initial traverse stroke length (m)
CF = traverse stroke length at full bobbin (m)
CT = total traverse stroke length (m)
d = fiber diameter (m)
DF = package diameter at full bobbin (m)
DS = bobbin diameter (m)
N = number of traverse strokes
n = denier of the yarn
p = traverse coil pitch (m)
$\overrightarrow{P_i}$ = yarn position vector at the i-th traverse
S = total yarn length (m)
S_i = yarn length wound in the i-th stroke (m)
T = total winding time (s)
ΔT = winding time for each stroke (s)
V = total volume of package (m^3)

2002년 5월 27일 접수
* 창원대학교 기계설계공학과
** 한국기계연구원 산업기계그룹

V_n = net volume of yarn in the package (m^3)
v_{ti} = traverse speed at the i-th stroke (m/s)
v_y = yarn speed (m/s)
W = package weight(mass) (kg)
z_i = stroke length at the i-th traverse (m)
ζ = package volume compensation factor
ρ = mass density of yarn (kg/m^3)
ϕ = cone angle (rad)
ω_i = bobbin spin speed in i-th traverse (rad/s)

1. 서론

캠기구 방식 권사기(捲絲機)[1]와 달리 모터제어식 권사기는 보빈(bobbin)의 회전속도(回轉速度), 트래버스(traverse) 속력과 행정(行程)을 조절함으로써 다양한 팩키지(package) 형상의 권사가 가능하다. 그런데 사속(絲速)이 일정하게 유지되지 않으면 장력 변화가 발생하여[2] 권사 도중에 실이 끊어지거나 사층(絲層)이 균일하게 되지 않을 뿐만 아니라[3] 실이 풀릴 때의 장력도 불균일하게 되므로 직물의 품질도 떨어뜨리게 된다. 또한 트래버스 행정과 속력을 잘못 제어하면 원하는 팩키지 형상을 기대할 수 없고 권사 도중에 사층이 무너질 수도 있다. 그러므로 사속을 일정하게 유지하면서 원하는 팩키지 형상으로 권사하는데 필요한 보빈의 회전속도, 트래버스 속력과 행정 등을 기구학적으로 정확하게 해석하는 것이 매우 중요하다.

본 논문은 디그레시브 권사 방법(degressive pirn winding)으로 주어진 사중(絲重)의 원사(原絲)를 원하는 팩키지 형상으로 감기 위한 권사 과정의 기구학적 해석과 제어 알고리듬을 제시하고 그 유효성을 모사실험을 통하여 입증하였다.

2. 만권시 팩키지의 형상치수 결정

사중이 주어지면 만권시의 팩키지 형상치수를 결정해야 한다. 요구되는 팩키지의 기본형상은 Fig. 1과 같다. 먼저 팩키지에 감긴 실의 순 부피(net volume of the yarn) V_n은 다음 식과 같다.

$$V_n = A \times s \tag{1}$$

실의 굵기가 n 데니어[4]라면, 데니어의 정의(9000 m의 실이 1 g일 때를 1 데니어로 정의함)로부터 실의 길이와 사중의 관계는 다음과 같다.

$$s = 9\times10^6 \frac{W}{n} \tag{2}$$

식(1)과 식(2)에서 만권시 사중 W와 V_n의 관계는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$W = \frac{nV_n}{9A} \times 10^{-6} \tag{3}$$

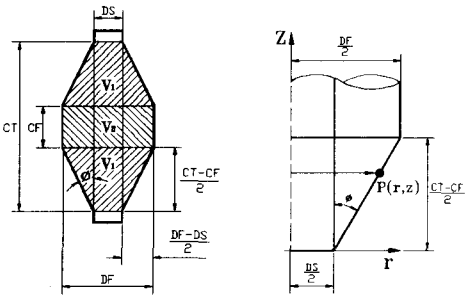


Fig. 1 Package dimensions and partitioned volumes

실의 순 부피와 만권시 팩키지의 기하학적 부피의 비를 다음과 같이 부피 보정상수 ζ로 정의하면,

$$\zeta = \frac{V_n}{V} \tag{4}$$

식(3)과 (4)에서 부피 V는 다음과 같이 된다.

$$V = 9\times10^6 \frac{AW}{n\zeta} \tag{5}$$

Fig. 1의 기하학적 관계에서 다음 식을 얻는다.

$$CF = \frac{-1}{\tan\phi} DF + \frac{1}{\tan\phi} DS + CT \tag{6}$$

위 식에서 미지수는 CF와 DF이다.

또한 Fig. 1에서 만권시 보빈의 부피를 제외한 팩키지 만의 부피 V는 다음과 같다.

$$V=2V_1+V_2-\frac{\pi}{4}(DS)^2CT \tag{7}$$

여기서 V_1은 다음의 적분 식으로 표현된다.

$$V_1=\int_0^{(CT-CF)/2}\pi r^2 dz \tag{8}$$

위 적분을 계산하기 위하여 우선 Fig. 1로부터 기하학적 관계를 이용하여 dz를 dr로 변환한다. 즉, Fig. 1에서 팩키지 부피가 V_1인 부분에서의 실의 위치좌표 $p(r,z)$에서 반경방향 좌표 r과 트래버스 행정의 수직방향 좌표 z, 및 보빈 반경 $DS/2$의 기하학적 관계는 다음 식과 같다.

$$\frac{r-DS/2}{z}=\tan\phi \tag{9}$$

식(9)에서 DS와 ϕ는 상수이므로 $dz=\frac{dr}{\tan\phi}$의 관계를 얻고, 이를 이용하여 (8)식을 r에 관한 적분식으로 변환하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned}V_1&=\int_{DS/2}^{DF/2}\pi r^2\frac{dr}{\tan\phi}\\&=\frac{\pi}{24\tan\phi}\{(DF)^3-(DS)^3\}\end{aligned} \tag{10}$$

그리고 V_2도 Fig. 1에서 다음과 같이 계산된다.

$$V_2=\pi\left(\frac{DF}{2}\right)^2(CF) \tag{11}$$

식(6)과 식(11)에서 V_2는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned}V_2=&-\frac{\pi}{4\tan\phi}(DF)^3\\&+\frac{\pi}{4}\left(CT+\frac{DS}{\tan\phi}\right)(DF)^2\end{aligned} \tag{12}$$

만권시 팩키지 부피와 사중의 관계인 (5)식과 (7)식, (10)식 및 (12)식으로부터 만권시의 최대 팩키지 직경 DF의 관계식은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned}(DF)^3-\frac{3}{2}\{(\tan\phi)CT+DS\}(DF)^2+\frac{1}{2}(DS)^3\\+54\times10^6\frac{AW}{n\zeta\pi}\tan\phi+\frac{3}{2}(DS)^2CT\tan\phi=0\end{aligned} \tag{13}$$

위 식은 DF를 x로 두면 다음과 같이 $f(x)=0$의 일 변수(一變數) 방정식을 푸는 문제이다.

$$f(x)=x^3+\alpha x^2+\beta=0 \tag{14}$$

위에서,

$$\alpha=-\frac{3}{2}\left\{(\tan\phi)CT+DS\right\} \tag{15}$$

$$\begin{aligned}\beta=&\frac{1}{2}(DS)^3+\frac{54AW}{\pi n\zeta}\tan\phi\\&+\frac{3}{2}(DS)^2CT\tan\phi\end{aligned} \tag{16}$$

식(14)의 해(解)는 변수 DF 즉 x의 범위를 알아야 여러 개의 해 중에서 물리적 의미가 있는 해를 선별해 낼 수 있다.

먼저 x의 하한(下限), 즉 $(DF)_{min}=DS$ 임을 알 수 있다. x의 상한(上限), 즉 $(DF)_{max}$는 Fig. 2를 참조하면 다음과 같다.

$$(DF)_{max}=DS+(\tan\phi)CT \tag{17}$$

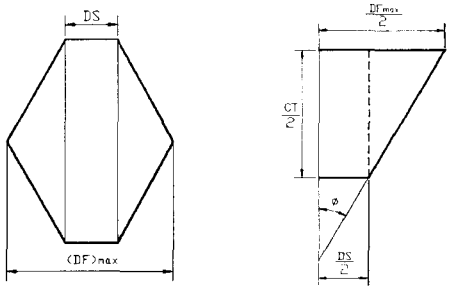


Fig. 2 Maximum dimensions of the full package

따라서 식(16)은 $DS\le x\le DS+(\tan\phi)CT$의 범위 안에 존재하면서 $f(x)=0$을 만족하는 x, 즉 DF를 구하는 문제로 귀착된다. x에 대한 3차 방

정식을 푸는 해법으로 이분법(Bisection Method)이나 뉴턴-랍슨 방법(Newton-Raphson Method)[5]을 이용할 수 있다. DF가 구해지면 (6)식에서 CF가 결정된다.

3. 기구학적 권사 제어알고리듬

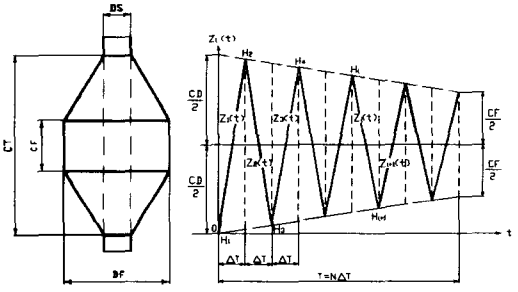
3.1 권사 행정의 기구학 해석

Fig. 3은 만권시 요구되는 팩키지의 형상과 트래버스 행정변화이다. Fig. 3(b)에서 총 권사시간 T 동안 N번의 트래버스 행정이 이루어지며, 시간간격 ΔT은 일정하다. i번째 권사 행정에서의 실의 z축 좌표 $z_i(t)$는 다음과 같이 구해진다.

$$z_i(t) = \frac{H_{i+1}-H_i}{\Delta T}[t-(i-1)\Delta T]+H_i, \quad \text{for } (i-1)\Delta T \le t \le i\Delta T, \ (i=1,2,3,\cdots\cdots,N) \tag{18}$$

위 식(18)에서 i번째 권사 행정에서의 시작점과 끝점인 H_i는 다음과 같이 구해진다.

$$H_i = (-1)^{i+1}\frac{CD-CF}{2N}(i-1) + \frac{CD}{2}[1+(-1)^i], \ (i=1,2,\cdots,N) \tag{19}$$



(a) package dimension (b) traverse change

Fig. 3 Degressive pirn and its traverse change

따라서 i번째 권사 행정에서의 트래버스 속력 v_{ti}는 식(18)을 미분하면 다음과 같이 구해진다.

$$v_{ti} = \frac{dz_i(t)}{dt} = \frac{H_{i+1}-H_i}{\Delta T} \quad (i=1,2,3,\cdots\cdots,N) \tag{20}$$

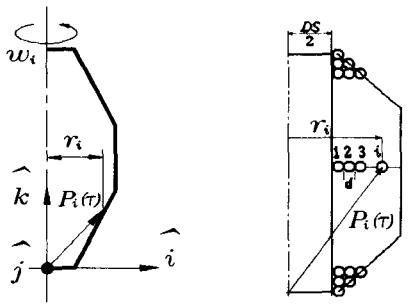
한편 Fig. 4에서 i번째 권사 행정에서의 실의 위치벡터 $\overrightarrow{P_i}(t)$는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\overrightarrow{P_i}(t) = r_i\cos\omega_i t\,\hat{i} + r_i\sin\omega_i t\,\hat{j} + z_i(t)\,\hat{k}, \quad \text{for } (i-1)\Delta T \le t \le i\Delta T, \ (i=1,\ 2,\ 3,\ \cdots\cdots,\ N) \tag{21}$$

여기서 r_i는 i번째 권사 행정에서의 극좌표로 나타낸 실의 위치벡터의 반경방향 성분이다.

Fig. 4(b)에서와 같이 실의 단면이 지름 d인 원형이고, 매번의 트래버스 행정마다 팩키지의 반경이 실의 지름만큼씩 증가한다고 가정하면 i번째 트래버스에서의 팩키지의 반경 r_i은 다음과 같다.

$$r_i = d\times(i-1)+\frac{DS+d}{2} \quad (i=1,2,3,\cdots N) \tag{22}$$



(a) yarn position vector (b) package section

Fig. 4 Yarn position and package diameter increment at i-th traverse stroke

i번째 권사행정에서의 실의 속력은 식(21)의 위치 벡터의 도함수로서 다음과 같이 구해진다.

$$\overrightarrow{v_i} = r_i\omega_i(-\sin\omega_i t\,\hat{i} + \cos\omega_i t\,\hat{j}) + v_{ti}(t)\,\hat{k}, \ (i=1,2,\cdots,N) \text{ for } (i-1)\Delta T \le t \le i\Delta T \tag{23}$$

그러므로 i번째 권사 행정에서의 실의 속력은 다음과 같이 계산된다.

$$v_i = \sqrt{(r_i\omega_i)^2+(v_{ti})^2} = \sqrt{(v_{yi})^2+(v_{ti})^2} = \sqrt{(v_y)^2+(v_{ti})^2}, (i=1,2,3,\cdots,N) \quad (24)$$

Fig. 5의 권사행정의 기구학적 관계로부터, 트래버스 코일(coil) 피치 p는 일정하다면 i번째 트래버스 속력 v_{ti}는 다음 관계식을 만족하여야 한다.

$$v_{ti} = \frac{dz_i(t)}{dt} = \frac{\omega_i p}{2\pi}, \quad (i=1,2,3,\cdots,N) \quad (25)$$

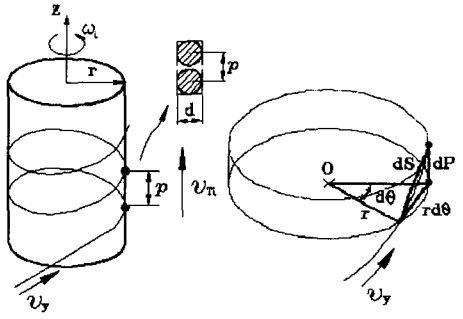


Fig. 5 Kinematic relations between traverse coil pitch, traverse velocity and spin speed

그리고 사속 v_y은 항상 일정하므로 i번째 권사 행정의 보빈 회전속도는 다음과 같이 결정된다.

$$\omega_i = \frac{v_y}{r_i} \quad (26)$$

대부분의 권사기에서 보빈 반경은 트래버스 피치보다 20배 이상 크므로 $p \ll 2\pi r_i$라고 가정하면, 식(26)과 식(24)으로부터 i번째 권사행정의 사속은 다음과 같이 구해진다.

$$v_i = \sqrt{v_y^2+v_{ti}^2} = r_i\omega_i\sqrt{1+\left(\frac{p}{2\pi r_i}\right)^2} \approx v_y, \quad (i=1,2,3,\cdots,N) \quad (27)$$

또한 식(26)과 식(25)으로부터 i번째 권사행정의 트래버스 속력 v_{ti}는 다음과 같이 구해진다.

$$v_{ti} = \frac{pv_y}{2\pi r_i}, \quad (i=1,2,3,\cdots,N) \quad (28)$$

3.2 총 작업시간의 결정

임의의 i번째 권사 행정동안에 감긴 실의 길이 s_i는 다음 식과 같이 구해진다.

$$s_i = \int_{T_{i-1}}^{T_i} v_i dt = v_i \Delta T, \quad (i=1,\ 2,\ 3,\ \cdots,\ N) \quad (29)$$

위 식에서 T_i는 $T_i = i\Delta T$, $(i=1,2,\cdots,N)$로 정의되는 적분구간으로서 i번째 권사 행정의 시간 구간은 $T_{i-1} \le t \le T_i$에 해당되고, 그 시간 간격의 크기는 ΔT이다.

(29)식과 (27)식에서 s_i를 구하면 다음과 같다.

$$s_i \cong v_y \Delta T, \quad (i=1,2,3,\cdots,N) \quad (30)$$

따라서 실의 총 길이 s는 다음과 같다.

$$s = \sum_{i=1}^{N} s_i = \sum_{i=1}^{N} v_y \Delta T = v_y N \Delta T = v_y T \quad (31)$$

한편 (2)식을 식(31)에 대입하면 총 권사작업 시간 T와 사속 v_y 및 사중 W의 관계를 구한다.

$$T = 9\times10^6 \frac{W}{n v_y} \quad (32)$$

3.3 총 트래버스 회수와 코일 피치의 결정

Fig. 3 및 Fig. 4에 보인 팩키지의 기하학적 형상과 권사행정 선도로부터 권사행정의 총 회수 N은 다음과 같이 구해진다.

$$N = \frac{DF-DS}{2d} = \frac{CT-CF}{2d}\tan\phi \quad (33)$$

앞서 총 권사시간 T 동안 N번의 트래버스 행정이 이루어지며, 각각의 트래버스 행정시간은 일정하다고 가정하였으므로 ΔT은 다음과 같다.

$$\Delta T = \frac{T}{N} = 9\times10^{6}\frac{W}{Nnv_y} \tag{34}$$

Table 1 Recommended traverse coil pitch according to denier value

Range of denier	Recommended traverse coil pitch ($\times10^{-3}$m)
$n < 75$	0.5
$75 \le n \le 75$	0.7 ~ 2.0
$300 < n$	1.0 ~ 3.0

트래버스 코일(coil) 피치 p는 식(25)에서 보듯이 트래버스 속력을 결정하는 데에 필요하다. 트래버스 속력은 권사 과정에서 팩키지 형상을 형성하는데 큰 영향을 미치므로 트래버스 피치 값을 적절하게 선택하는 것이 매우 중요하다. 적정 트래버스 피치 값은 사종(絲種)과 권사 방법에 따라 차이가 있으나, 흔히 데니어 값의 크기에 따라 Table 1의 권장값을 사용한다[4,7].

3.4 권사제어 알고리듬

트래버스 행정의 하한점(下限点)을 원점으로 하여 권사 알고리듬을 기술하면 아래와 같다.

(i) 뉴톤-랍슨방법(Newton-Raphson method)을 이용하여 식(6)과 식(13)으로부터 DF와 CF를 계산한다.

$$N = INTEGER\left[\tan\phi\times\frac{CT-CF}{2d}\right],$$

$$T = 9\times10^{6}\times\frac{W}{nv_y},\quad \Delta T = \frac{T}{N},$$

$$i = 1$$

(ii) $$H_i = (-1)^{i+1}(i-1)\times\frac{(CD-CF)}{2N} + \frac{CD}{2}\times[1+(-1)^{i}]$$

$$\Delta Z_i = H_{i+1} - H_i$$

$$r_i = (i-1)\times d + \frac{DS+d}{2},$$

$$\omega_i = \frac{v_y}{r_i},\quad v_{ti} = \frac{pv_y}{2\pi r_i}$$

$$s_i = v_y\times\Delta T,$$

$$\vec{p}_i(t) = r_i\cos\omega_i\tau\hat{i} + r_i\sin\omega_i\tau\hat{j} + v_{ti}\tau\hat{k},\quad \text{for } (i-1)\Delta T \le \tau \le i\Delta T$$

(iii) $i = i+1$,

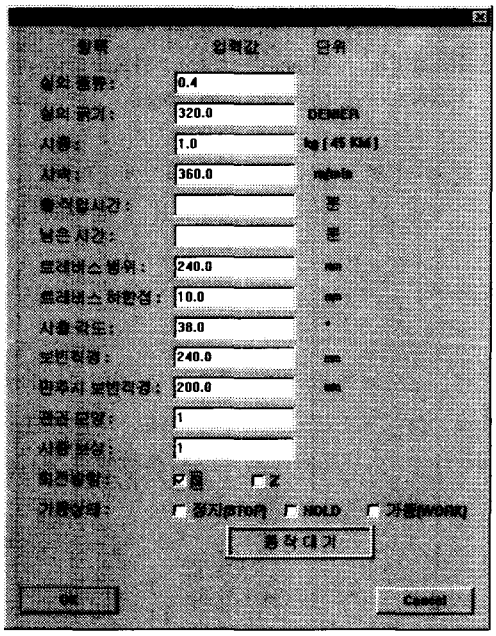
$t = i\times\Delta T$,

if ($t > T$) stop

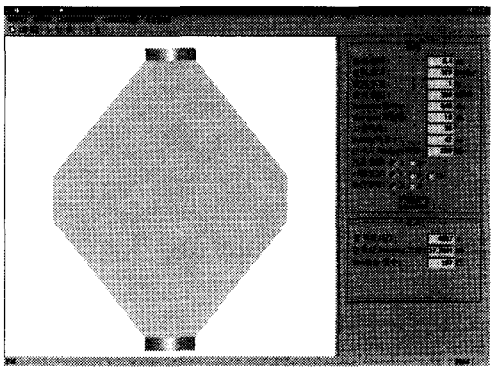
else go to (ii)

4. 컴퓨터 모사실험

위에서 제시한 디그레시브 권사 알고리듬에 따라 권사제어 목표 값을 계산하고, 권사과정을 그래픽으로 보여줄 수 있는 컴퓨터 프로그램으로 작성하여 컴퓨터 모사실험을 수행하였다. 프로그램에 실의 종류를 입력하면 그 실에 대한 직경 d값은 데이터 베이스(data base)에서 검색하여 사용하도록 되어 있다. 부피 보정상수 ζ는 실제 권사과정에서의 사중보상을 고려하기 위한 것이다. 대개 사중의



(a) input menu



(b) graphic display of the simulation result

Fig. 6 Computer simulation of degressive winding

오차가 10%를 초과하지 않는다고 가정하고, 본 논문의 모사실험에서는 편의를 위하여 ζ= 0.99, 0.95, 0.90 (메뉴에서 사중보상 1, 5, 10에 해당됨)의 3 단계로 나누어 사중보상을 고려하였다.

Fig. 6은 사중 1 kg의 실을 360 m/min의 사속으로 사충각도 38°로 권사하는 경우를 모사 실험한 경우의 입력 예와 출력 예를 보여준다.

이러한 컴퓨터 모사실험을 통하여 사용자가 원하는 팩키지 형상이 얻어지는지를 그래픽으로 손쉽게 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 디그레시브 권사 방법을 사용하는 경우에, 사속을 일정하게 유지하면서 일정한 사중의 원사(原絲)를 원하는 팩키지 형상으로 감기 위한 권사과정의 기구학적 해석을 수행하고, 그에 따른 권사제어 알고리듬을 제안하였다. 즉, 매 트래버스 행정마다 모터 구동식 권사기의 인버터 제어에 필요한 제어목표 값인 트래버스 속력과 행정, 스핀들의 회전속도를 제공함으로써 이 데이터를 이용하여 권사제어가 가능하도록 하였다.

특히 컴퓨터를 이용한 권사 모사실험에서 제안된 권사제어 알고리듬이 디그레시브 펀 권사에 유용하게 적용될 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 논문은 한국과학재단지정 창원대학교 공작기계기술연구센터와 국기계연구원의 지원에 의하여 수행된 연구결과의 일부입니다.

참고문헌

1. Lorenz, R., "Volkmann : linking, Twisting and Winding," Textile World, No. 4, pp. 67-70, 1989.
2. Sukenori, S., Juhachi, O., Yoshinori, T., et al., "Measurement and Evaluation of Radial Young's Modulus Distribution in Yarn Package," 일본섬유기계학회지, Vol. 43. No. 10, pp. 49-55, 1990.
3. Sukenori, S., Juhachi, O., Hiroyuki, Y., Hideki, B.,"The Flow Around the Rotating Pirn and Power Loss," 일본섬유기계학회지, Vol. 4, No. 1, pp. 87-95, 1992.
4. 日本纖維機械學會 纖維工學刊行委員會編, "纖維工學 (III): 系の製造・性能及び物性," 日本纖維機械學會, 1987.
5. Burden, R. L. and Fairs, J. D., "Numerical Analysis," 3rd Ed., Weber & Schmidt, 1985.
6. 최영휴, 정원지, 김광영, 김종수, "Pirn Winder의 권취형상에 대한 기구학적 제어알고리즘 개발," 한국정밀공학회 '95춘계학술대회 논문집, pp. 336-341, 1995.
7. 최영휴, 김광영, 김종수, "Alternate Pirn의 권취형상제어를 위한 기구학적 제어알고리즘 개발," 한국정밀공학회 '96 추계학술대회 논문집, pp. 413-418, 1996.