

## 유압제어식 멀티셀 패더롤의 가속시험을 통한 성능평가 기법 연구

# An Experimental Study on the Performance Evaluation Method of Padder Roll by Hydraulic Multi Cell with Acceleration Test

조경철<sup>1</sup> · 이은하<sup>1\*</sup> · 박시우<sup>1</sup> · 김수연<sup>2</sup>

Kyung Chul Cho, Eun Ha Lee, Si Woo Park and Soo Youn Kim

Received: 06 Nov. 2017, Revised: 24 Apr. 2018, Accepted: 17 Aug. 2018

**Key Words** : Cold-Pad-Batch Dyeing System(상온염색시스템), Padder Roll(패더롤), Contact Pressure(접촉압력), Accelerated Test(가속시험), Hydraulic Control(유압제어)

**Abstract**: The hydraulic control valve, used in the CPB (cold-pad-Batch) cold dyeing system, passes through a pressurized material that absorbs the dye. The hydraulic control of the hydraulic control panel shall be driven in a uniform and precisely controlled manner, as it interferes directly with the dyschromatism. In this study, an acceleration test model was employed to verify the durability of the hydraulic control of the hydraulic control panel, which was manufactured by the scenic model, and the pre-roll angle was analyzed before the performance of acceleration test. Based on the change in the amount of deformation of the padder roll the durability of the padder roll was analyzed along with verification of the durability of the skin and the rubber coating in contact with the fabric. Furthermore, the accelerated test method used for hydraulic controlled multi-cell padder rolls was verified.

### 기호 설명

$L$  : life measure  
 $V$  : stress level  
 $K$  : one of the model parameter  
 $n$  : empirical value  
 $AF$  : acceleration factor  
 $L_{test}$  : life at accelerated stress level  
 $L_{use}$  : life at use stress level  
 $V_{test}$  : accelerated stress level  
 $V_{use}$  : use stress level

### 1. 서 론

염색가공 산업은 심미한 색상과 소비자가 원하는 성능을 부여하는 고부가가치 제조 분야로 현대 사회에서 다양한 종류의 원단을 생산하기 위해서 필수적인 생산공정이다.

원단에 염료를 침투시키는 염색가공은 다량의 용수와 높은 처리온도를 이용하여 에너지 및 자원문제에 심각성을 증가시키고 있다.

상온염색 CPB(Cold-Pad-Batch) 시스템은 고온에서 수행하는 염색을 상온에서 수행함으로써, 처리 용수와 에너지 사용량을 획기적으로 절감할 수 있는 염색 방법으로 완전히 펼쳐진 상태의 원단을 염료가 담겨있는 저장조에 침지시켜 충분한 원료를 흡수시킨 뒤 공압 또는 유압에 의해 구동되는 롤러를 통과하면서 적정량의 염료만 남겨 염색되는 시스템이다. 이때 사용되는 롤러는 패더롤(Padder Roll)이라 칭하며, 그 역할은 원단이 전체적으로 균일하면서도 적정

\* Corresponding author: eunha@kotmi.re.kr

1 Thermal Fluid Design Team, Korea Textile Machinery Convergence Research Institute, Gyeongbuk 38542, Korea

2 Department of Mechanical Engineering, Yeoungnam University, Gyeongbuk 38541, Korea

Copyright © 2018, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

한 접촉압력을 받도록 하여 패더롤을 통과한 원단이 폭 방향으로 지니고 있는 염료를 균일하게 원단에 침투시키게 하는 것이다.

CPB용 패더롤은 원단 전체에 균일한 접촉압력을 부여하도록 설계하는 것이 핵심 기술이다. 이러한 패더롤의 균일 압력 제어를 위한 대표적인 연구는 롤러 표면의 고무피복부에 크라운(crown)을 주는 연구, 롤러 끝단부에 보를 삽입하여 휨을 조정하는 연구, 롤러 내부에 주름관을 삽입하여 내부 압력을 가하는 방법을 활용한 연구, 고무코팅이 롤러 특성에 미치는 연구 등이 있다<sup>1)</sup>.

본 연구에서는 국내의 P사에서 제작한 유압제어식 멀티셀 패더롤을 사용하였으며, 구동방법은 회전하는 롤러 내부에 다중의 유압 셀을 적용하여 표면이 균압을 가지도록 휨 량을 조절하는 패더롤을 대상으로 연구하였다.

CPB 염색을 수행하는 패더롤은 높은 생산성에 대응하기 위하여 정밀하고 균일하게 작동되어야 한다. 이는 원단에 침투된 염료의 양에 따라서 생산되는 원단의 폭 방향과 길이 방향 색차로 인해 1회 생산 분량이 모두 불량으로 처리될 수 있기 때문이다.

이러하듯이 CPB 시스템에서 정밀 구동 부품인 유압제어식 패더롤은 염색 편차가 발생되지 않는 동일한 구동성능을 보여주어야 한다. 본 연구에서는 국산화 제작된 유압제어식 패더롤의 신뢰성을 평가하기 위해서 가속시험, 접촉압력 성능평가법을 설계하고 가속시험을 수행하여 패더롤의 성능을 검증하였다.

가속시험(accelerated testing)은 제품이나 부품의 설계/개발, 생산, 시험과정을 단기간에 성능이나 신뢰성을 평가하는 방법으로 일반적인 부품의 구동 환경보다 가혹한 구동환경을 구축하여 시험한다.

유공압에 의해 작동되는 부품의 가속시험법에는 다양한 고장원인 및 사용 환경에 따라 대표적으로 아레니우스(Arrhenius) 모형, 역승(Inverse Power Law) 모형, 온도-비열(Temperature - Nonthermal) 모형, 복합(General Log-Linear) 모형 등이 있다<sup>2)</sup>.

아레니우스 모형은 온도에 의한 가속시험법으로 가장 널리 사용되고 있는 모형이다. 역승 모형은 전압, 부하, 압력 등 온도 이외의 비열 스트레스를 통해 베어링, 공압실린더 등의 가속시험에 사용되는 모형이다. 온도-비열 모형은 아레니우스와 역승의 복합적인 개념으로 온도와 부하, 압력 등을 동시에 스트레스로 적용하는 모형이다. 복합 모형은 가속스트레스 인자의 수가 2개 이상이거나 설계 변수가 포함된

경우에 적용하는 모형이다<sup>2)</sup>.

본 연구에서는 압력에 대한 부하가 가장 크므로 역승모형의 가속시험을 설계하여 시험을 진행하였다. 패더롤을 가압하여 패더롤이 접촉하는 현상을 분석하고 이를 가속시험하여 패더롤의 수명과 성능을 검증함으로써 유압으로 제어되는 패더롤의 성능평가 기법을 연구하였다.

## 2. 실험구성 및 실험

### 2.1 유압제어식 멀티셀 패더롤

유압제어식 패더롤은 Fig. 1과 같이 패더롤 축을 양쪽 끝에서 고정하고 고무코팅된 스틸튜브를 회전시켜 운전하는 구조로 이루어져 있다. 고무코팅된 접촉부의 균압제어를 위하여 패더롤 축과 스틸튜브 사이에 제작된 유압 셀에 유압을 공급하면 스틸튜브가 변형하여 중심부가 가압되는 구조로 이루어져 있다. 패더롤 구동시 패더롤 축(Shaft)는 고정되어 회전하지 않으며, 양끝단이 가압되는 구조로 되어있다.

유압을 공급하는 포트는 3개로 패더롤의 중심을 가압하는 셀과 좌, 우측을 가압하는 셀로 구성되어 개별 작동하여 스틸튜브를 가압한다(Fig. 2). 가압된 스틸튜브는 패더롤 접촉구동시 Fig. 3과 같은 현상을



Fig. 1 Structure of Padder Roll

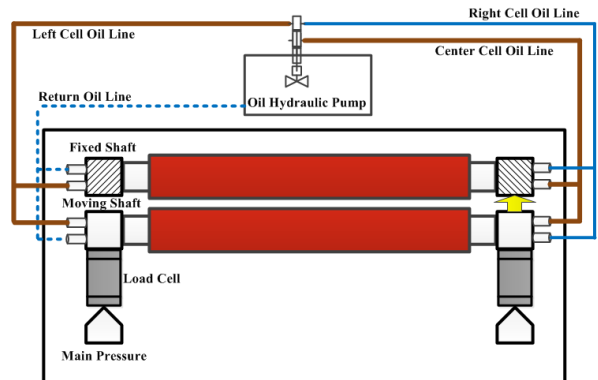


Fig. 2 Main pressure, inner pressure constitution diagram

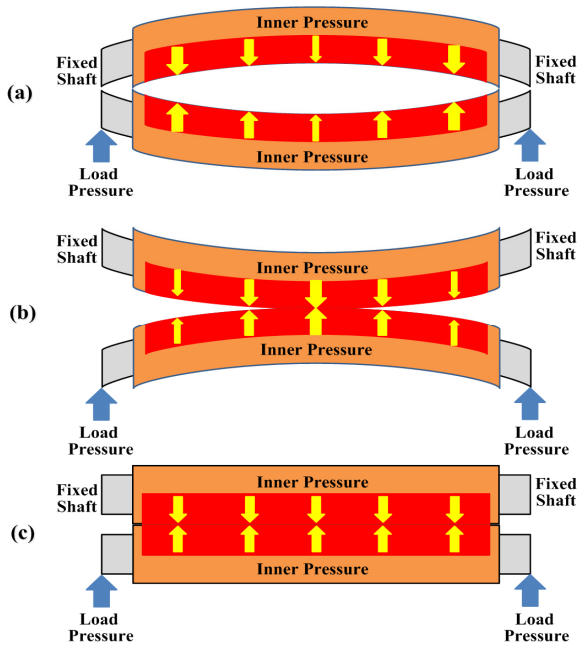


Fig. 3 Contact Shape of Padder Roll

보인다. 좌, 우측 유압셀에 과도한 압력이 부가되면 (a)와 같이 중심부에 저압이 걸리며, 중심부에 과도한 압력이 부가되면 (b)와 같이 중심부만 가압된다. 축을 가압하는 환경과 유압을 공급하는 환경이 최적의 상태일 경우 (c)와 같은 형태로 패더롤이 접촉 구동하게 된다<sup>3)</sup>.

고무코팅된 패더롤의 접촉부 면장은 2,400mm로 제작되었다. 패더롤의 접촉압력은 패더롤 휨량을 제어하는 내부 유압 셀의 내압력과 축을 제어하는 공압의 주압력에 의해 발생하며, 각각의 유압과 공압은 솔레노이드밸브를 통하여 제어된다.

## 2.2 성능평가장치 구성

유압제어식 멀티셀 패더롤의 성능평가를 위하여 패더롤이 실제 CPB시스템에서 구동하는 방법과 동일하게 장치를 구성하였다(Fig. 4). 패더롤간의 접촉은 축 양 끝단을 가압하는 벨로우즈 실린더와 패더

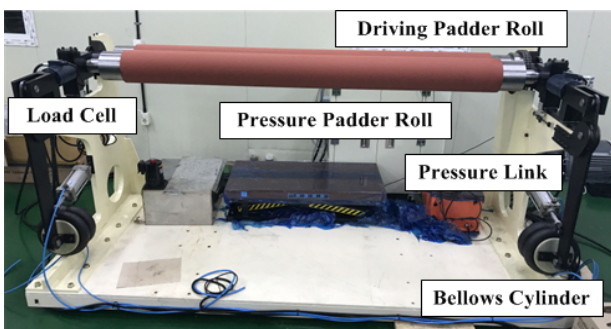


Fig. 4 Picture of Experimental setup

롤 내부 3개의 셀에 유압을 가하는 유압펌프를 사용하여 가압하였다.

벨로우즈 실린더는 공압으로 부풀어지며, 링크 구조로 패더롤의 축을 가압하여 고정된 패더롤과 접촉하게 된다<sup>4)</sup>.

## 2.3 실험

실험은 멀티셀 패더롤 단독 구동에 의한 휨량 측정, 한 쌍의 멀티셀 패더롤 접촉 구동에 의한 접촉압력 측정, Pick-up을 측정으로 진행하였다.

패더롤 측정지점은 고무코팅부에서 5개 지점을 선정하여 측정하였다. 패더롤의 단독 구동 휨량은 Keyence사의 Laser Displacement Meter를 사용하여 원점에서부터 내압을 가하였을 때 변위 값을 확인하여 분석하였다.

접촉 구동간 접촉압력은 FujiFilm사의 Prescale Film을 사용하여 접촉압력 수치를 분석하였으며, Pick-up율은 원단 무게대비 원단이 함유하고 있는 액체의 비율로 100mm\*100mm 크기의 면직물 시편을 무게 측정하여 계산하였다.

패더롤 단독 구동에 의한 휨량 측정은 내압을 1bar, 2bar, 3bar, 4bar에서 수행하였으며, 패더롤의 내부에 오일이 공급되었을 때 패더롤이 변형되는 정도를 분석하였다.

패더롤 간의 접촉압력 측정조건은 패더롤 접촉부에 16.34N/mm<sup>2</sup>의 선압력을 가하고, 패더롤 내부에는 2bar의 내압력을 부가하여 측정을 수행하였다. 또한 내구시험 평가에서는 가속시험을 충족하는 시간동안 구동 후 패더롤 휨량과 접촉압력을 측정하여 패더롤의 성능을 평가하였다.

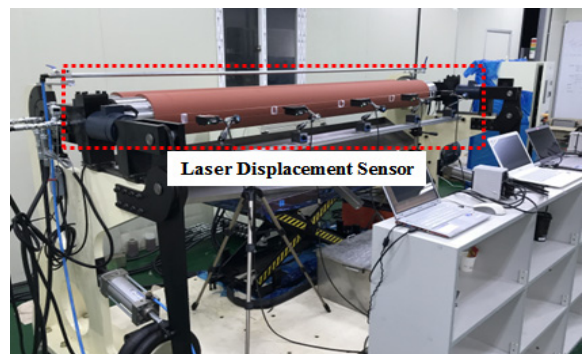


Fig. 5 Measuring of Displacement

## 3. 가속시험

### 3.1 가속시험의 설계

CPB 시스템은 압력과 속도에 스트레스 영향을 받

고 있으며, 베어링과 공압, 유압의 운전영역에서 구동되고 있으므로 역승 모형을 적용하였다. 역승모형에서 비열 스트레스 V와 수명L(V)의 관계는 (1)식과 같다<sup>5)</sup>.

$$L(V) = \frac{1}{K \cdot V^n} \quad (1)$$

식 (1)에서 K와 n은 역승모형에 대한 상수이다. 식 (1)의 양변에 자연로그를 취하게 되면

$$\ln(L) = -\ln(K) - n \cdot \ln(V) \quad (2)$$

식 (2)와 같은 직선그래프로 표현할 수 있으며, 역승모형 상수 값인 K와 n을 구하기 위해서 직선의 기울기와 절편을 사용하여 산출 할 수 있다.

여기서 n 값은 가속시험 데이터에서 추정할 수 있으며, 금속, 기계, 전자 부품류에서는 선행 연구에 의한 경험적 상수 값으로 사용한다<sup>6)</sup>.

역승모형에서 스트레스의 정도는 표 1에서 보면 기계금속 부품, 베어링류의 n값은 2~3정도이며, 전자 부품에서는 7~12정도의 높은 스트레스 수치를 보여 주고 있다<sup>6)</sup>.

역승모형에서 가속계수(AF)는 실제 사용조건과 가속 시험조건을 반영하여 산출한다. 실제 사용조건은 비열수준의 스트레스이며, 가속 시험조건은 스트레스 수준이다.

$$AF = \frac{L_{use}}{L_{test}} = \frac{\frac{1}{K \cdot V_{use}^n}}{\frac{1}{K \cdot V_{test}^n}} = \left(\frac{V_{test}}{V_{use}}\right)^n \quad (3)$$

Table 1 Empirical value of 'n'

Metal parts	2 ~ 3
Electronic parts Solder Bonding	2 ~ 3
Ball Bearing	3
Roller Bearing	10/3
Microelectronics Plastic Encapsulant	4 ~ 8
Microelectronics Passivation Layer	12
Microelectronics Circuits Cratering	7

식 (3)은 실제사용조건  $L_{use}$ 와 가속시험조건인  $L_{test}$ 에서 시험을 진행하였을 때 가속계수 산출결과이다.

### 3.2 가속시험 시간

염색공장에서 고무 코팅된 패더롤의 경우 1년간 사용하고 고무 재코팅을 수행하고 지속적인 사용을 하고 있다. 따라서 P사에서 제작된 멀티셀 패더롤의 1년 구동 조건을 부가하였다.

일반 염색 공장에서 1일 8시간 염색공정을 수행한다고 볼 때, 패더롤은 주 5일로 1년간 운전시 2,080시간이 운전된다고 볼 수 있다.

시험은 실제사용조건보다 가압되어 회전하는 속도가 1.5배 가속화된 운전 조건에서 시험이 진행 되었으며, 롤러베어링과 유사한 구동력을 가지고 있으므로 n값은 10/3을 선정하였다.

$$AF = \left(\frac{V_{test}}{V_{use}}\right)^n = \left(\frac{1.5}{1}\right)^{\frac{10}{3}} = 3.86 \quad (4)$$

식 (4)에서 계산된바와 같이 실험 조건에서의 가속 계수는 3.86이 산출된다.

유압제어식 멀티셀 패더롤이 현장에서 1년간 운전 조건을 비교해보면 성능평가장치에서 약 538시간을 구동하면 패더롤이 1년간 구동되어 졌다고 볼 수 있다.

본 실험에서는 패더롤 접촉 가압조건을 주압력 16.34N/mm<sup>2</sup>, 패더롤 내압력 2bar로 하였고, 패더롤을 회전시키는 속도를 45m/min에서 538시간을 구동하여 패더롤이 1년동안 운전한 조건을 구사하였다.

## 4. 실험 결과

멀티셀 패더롤의 가속시험결과는 패더롤의 내부 유압에 대한 휨량, 패더롤 간의 접촉 압력을 분석하여 성능평가를 실시하였으며, 이를 검증하기 위하여 패더롤 통과시 원단 Pick-up을 결과를 비교하였다.

### 4.1 패더롤 휨

패더롤 휨량 변화결과는 Fig. 6과 같게 나타났으며, 가속시험 전후로 내압영역 4개 구간에서 유사한 휨량을 보여주었다.

패더롤의 휨량은 중심부에서 내부 유압이 1bar 일 때 7.17% 감소하는 수치를 보여주고 있으며, 나머지 내압에서는 -1.5% 이내의 변형량 차이가 나타났다.

패더롤의 가장자리에서는 내부 유압이 1bar 일 때 23%의 변형량 차이를 보여주고 있으며, 나머지 내압에서는 10% 이내의 변형량 차이를 나타내었다.

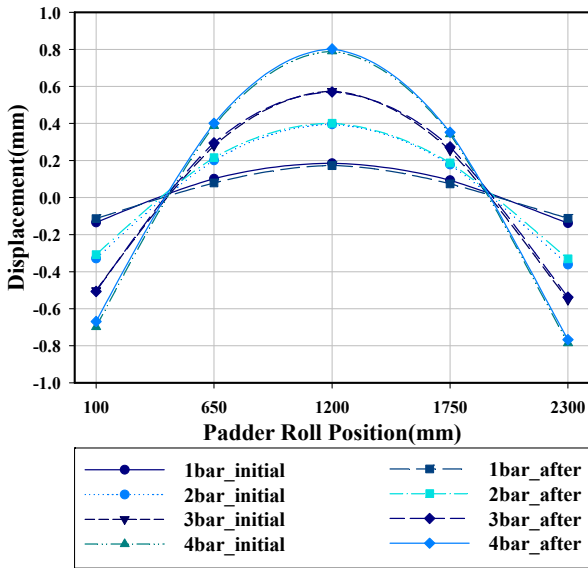


Fig. 6 Displacement of padder roll according to the inner pressure

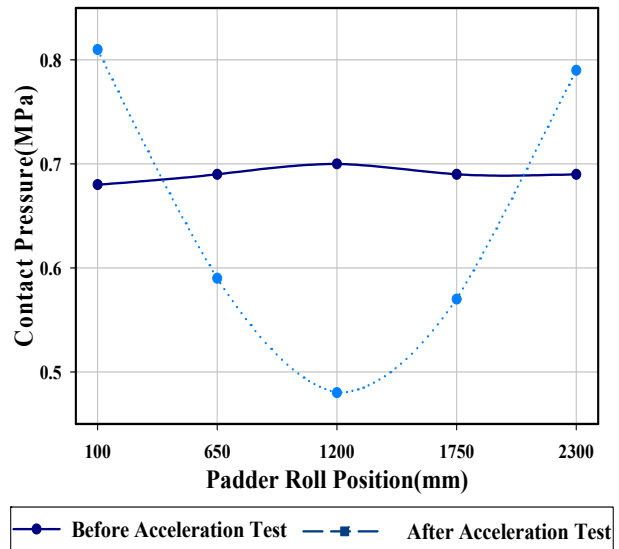


Fig. 7 Contact pressure at load pressure 16.34N/mm<sup>2</sup>, inner pressure 2bar

Table 2 Detail displacement of Padder roll

position	100	650	1,200	1,750	2,300
1bar_initial	-0.135	0.102	0.185	0.093	-0.138
1bar_after	-0.114	0.079	0.173	0.074	-0.112
2bar_initial	-0.329	0.201	0.395	0.178	-0.362
2bar_after	-0.308	0.215	0.401	0.187	-0.331
3bar_initial	-0.502	0.279	0.575	0.255	-0.553
3bar_after	-0.507	0.295	0.570	0.273	-0.538
4bar_initial	-0.699	0.387	0.790	0.342	-0.786
4bar_after	-0.669	0.401	0.802	0.352	-0.767

#### 4.2 패더롤 접촉압력

패더롤 접촉구동에서 주압력 16.34N/mm<sup>2</sup>, 내압력 2bar 일 때 패더롤 간의 접촉압력 결과는 Fig. 7과 같다.

패더롤의 접촉압력은 가속시험 전 균압지점으로 접촉압력편차가 ±2.5% 이내로 측정되었으나, 가속시험 후는 접촉압력 편차가 ±25% 로 급격한 변화를 나타내었다.

#### 4.3 원단 Pick-up을 측정

4.2의 패더롤 접촉 압력 측정 구동과 동일한 조건으로 패더롤 구동간 패더롤을 통과하는 원단의 Pick-up을 측정 결과는 Fig. 8과 같다.

패더롤의 접촉압력과 같이 Pick-up을 또한 가속시험 전 균압분포 형상을 보여주었지만, 가속시험 후 중심부의 접촉압력이 떨어지는 Pick-up을 분포를 보여주었다.

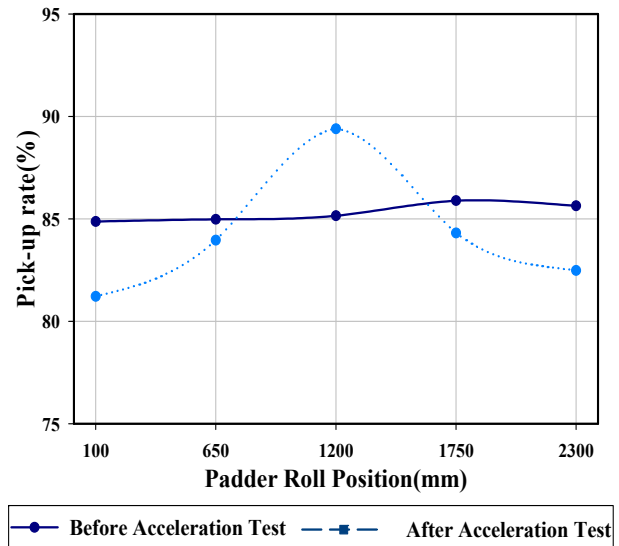


Fig. 8 Pick-up rate at load pressure 16.34N/mm<sup>2</sup>, inner pressure 2bar

### 5. 결 론

본 논문에서는 유압으로 제어되는 멀티셀 패더롤의 주압력, 내압력에 따른 힘량, 접촉압력 성능을 측정하였으며, 패더롤의 내구성능을 판단하기 위하여 가속시험을 수행한 결과는 다음과 같다.

1) 패더롤의 단독 힘량 변화는 중심부에서 약 7% 이내로 나타났으며, 이는 패더롤 힘량 변화로는 0.012mm의 미비한 수치로 염색성에는 큰 영향을 미치지 않는다. 이는 P사에서 제작한 멀티셀 패더롤 시제품 1개를 대상으로 현장 사용 기준 1년 사용시간

에 증가하는 가속시험을 수행하고 분석한 결과로 접촉 가압한 현상은 고무의 노화가 발생하였으므로 가속시험조건이 형성되었다고 판단된다.

2) 패더롤간의 접촉압력, Pick-up을 결과에서는 멀티셀 패더롤 중심부에서 가압력이 저하됨을 볼수 있는데 이는 패더롤간의 접촉면에서 고무의 노화에 따른 탄성이 줄어들어 중심부에서는 압력이 감소하고, 양 끝단부에서는 접촉압력이 증가되는 것으로 보여진다.

3) 가속시험에서 패더롤의 변형량은 시험 전, 후 큰 차이를 보이지 않지만, 접촉압력과 Pick-up을에서는 동일 염색 공정이 불가능 할 정도로 접촉압력이 변화하였는데, 이와 같은 경우는 패더롤에 코팅된 고무만 교체할 경우 정상적인 구동으로 회복할 수 있다. 패더롤에서 가장 중요한 것은 장시간 사용시에도 동일한 변형량을 나타내는 것인데, 본 연구에 사용된 패더롤 또한 장시간 구동에 정상 구동함을 확인하였다.

국내에서 최초 개발된 유압제어식 패더롤의 균압 성능은 종래의 연구에서 확인되었으며, 패더롤의 접촉 구동간 가속시험을 설계하여 1년간의 구동조건을 가속시험 수행하였다. 유압제어식 패더롤의 휨량은 장시간 시험에도 최초와 유사한 성능을 보여 주었지만, 접촉압력 분포는 균압에서 양끝단부가 가압되고 있다. 이와 같은 패더롤의 성능평가 결과는 유압제어식 패더롤의 휨량, 접촉압력 분석 기법을 통하여 결과를 얻을 수 있었다.

또한 본 연구에서 제시한 성능평가 기법을 검증하기 위하여 수행한 원단의 Pick-up을 측정 분석에서도 성능평가 시험 결과와 일치하는 현상을 확인 할 수 있었어 본 기법이 타당함을 검증하였다.

향 후 패더롤의 성능평가 또는 패더롤 사용구간을 검증하기 위한 성능곡선을 도출하기 할 수 있음을 확인하였다.

## 후 기

이 연구는 2014년도 에너지기술개발사업의 연구비 (과제번호: 20142010102940) 일부지원에 의하여 수행되었음을 밝힙니다.

## References

- 1) K. C. Cho et al., "A Study on the Characteristic of Contact Pressure for CPB(Cold Pad Batch) Padder Roll Controlled by Hydraulic Single Cell," Textile Coloration and Finishing, Vol.29, No.2, pp.86-96, 2016.
- 2) D. S. Kim and H. E. Kim, "Accelerated Life Test for Fluid Power Components," Journal of The Korea Fluid Power Systems Society, Vol.7, No.1, pp.9-15, 2010.
- 3) S. H. Han, J. S. Jang and S. W. Ji, "Effect of Control Valve Flow Rates Characteristics on the Performance of an Air Spring", J. Drive and Control, Vol.13, No.3, pp.8-14, 2016
- 4) T. W. Ha et al., "Position Control of an Electro-Hydrostatic Rotary Actuator using Adaptive PID Control", J. Drive and Control, Vol.14, No.4, pp.37-44, 2017
- 5) D. S. Jung, J. W. Park and D. S. Kim, "Zero Failure Acceleration Test by Using Inverse Power Model," Journal of Mechanical Science and Technology, pp.142-143, 2011.
- 6) Y. I. Kwon, "Acceleration Test Method for Reliability Evaluation of Machinery Parts," Journal of KSME, Vol.57, No.9, pp.44-48, 2009.
- 7) T. H. Lee, "A Study on the Failure and Life Assessment of High Speed Spindle," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol.31, No.1, pp.67-73, 2014.