

◆ 특집 ◆ 인쇄전자 연속생산 시스템 기술

## 인쇄전자용 롤투롤 공정의 외팔보 형식 아이들 롤러

### Cantilever Type Idler Roller in Roll-to-roll Process for Printed Electronics

윤덕균<sup>1</sup>, 이승현<sup>1,✉</sup>, 강정식<sup>1</sup>, 최병오<sup>1</sup>  
Deokkyun Yoon<sup>1</sup>, Seung-Hyun Lee<sup>1,✉</sup>, Jeongsik Kang<sup>1</sup> and Byung-Oh Choi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 한국기계연구원 인쇄전자연구센터 (Korea Institute of Machinery and Materials)  
✉ Corresponding author: shlee79@kimm.re.kr, Tel: 042-868-7825

Manuscript received: 2011.7.26 / Accepted: 2011.9.5

*Roll-to-roll process is an emerging mass production method for printed and flexible electronics such as touch screen panel, RFID tag, thin film solar cell, and flexible display due to its high throughput. High precision in printing and coating is required to apply functional materials onto substrate. For such reason, every part of the roll-to-roll equipment needs to be precisely fabricated and to retain its precision under regular operation. In this article, the precision of cantilever type idler roller and a novel method to mitigate its deflection under web tension loading are discussed and the method is verified using both the numerical and the experimental works. The proposed method improves the structural rigidity of cantilever type roller whose advantages, such as low capital cost and high web path configurability, are maintained.*

Key Words: Roll-to-roll Process (롤투롤 공정), Idler Roller (아이들 롤러), Cantilever (외팔보), Bending (굽힘), Support Structure (지지구조), Structural Rigidity (구조강성)

#### 기호설명

$\delta_{max}$  = maximum roller deflection  
 $\theta_{\delta}$  = roller misalignment due to roller deflection  
 $E$  = Young's modulus  
 $I$  = second moment of area  
 $T_{avg}$  = average tension  
 $T_{max}$  = maximum tension on non-uniform tension zone  
 $T_{min}$  = minimum tension on non-uniform tension zone  
 $X_{\delta}$  = horizontal web movement  
 $l$  = width of roller  
 $w$  = uniform load on roller

#### 1. 서론

인쇄전자(printed electronic)는 인쇄기술을 이용하여 RFID 태그(RFID tag), 태양전지(photovoltaic), 터치스크린 패널(touch screen panel), 유연 디스플레이(flexible display) 등의 전자소자를 대량으로 저가에 생산할 수 있을 것으로 기대되는 기술이다. 인쇄전자 분야에서는 그라비아(gravure), 그라비아 오프셋(gravure-offset), 플렉소(flexo), 잉크젯(inkjet), 스프레이(spray), 슬롯다이(slot die) 등의 패터닝 또는 코팅 기술을 이용하여 도체, 부도체, 반도체 잉크 등의 기능성 잉크를 기판 위에 적층하여 생산하는 방식을 사용한다. 대량으로 저가에 전자소자를 생산하는 것이 목적이므로 롤투롤(roll-to-roll) 공정이 인쇄전자소자 상업화의 이상적인 후보 중 하나

로 꼽히고 있으며,<sup>1,3</sup> 종래에 롤투롤 공정은 미디어 인쇄, 후/박막 코팅, 직물소재 생산 등에 이용되어 왔다. 기존의 롤투롤 방식의 인쇄공정은 신문, 잡지, 포스터 등 가독성을 위주로 발전되어 왔기 때문에 일정수준 이상(50 - 100 μm)의 인쇄정밀도를 요구하지 않았다. 그러나 기능성 있는 전자소자를 생산하기 위해서는 이보다 더 높은 인쇄정밀도(10 - 50 μm)가 요구된다. 이를 위해서는 각 요소부품의 정밀도가 더욱 높아져야 한다.

롤투롤 공정에서는 롤(roll)로 감겨있는 유연한 피인쇄체(substrate)가 언와인더(unwinder)에서 리와인더(rewinder)까지 이송되며 피인쇄체의 성질을 변화시키는 인쇄나 코팅과 같은 공정이 행해지게 된다. 여기서 유연한 피인쇄체는 웹(web)이라고 부르기도 한다. 아이들 롤러는 롤투롤 공정 중 웹을 이송시키는 역할을 하며 높은 정밀도를 요구한다. 아이들 롤러는 지지방식에 따라 외팔보(cantilever)와 양팔보(simply supported)의 두 가지 형식으로 나뉘며 양팔보 형식 대비 외팔보 형식의 아이들 롤러에는 아래와 같은 장점이 있다.

- 웹 경로를 변경하거나 새로운 웹을 와인더에 거는데 용이함.
- 장비의 한 쪽이 터져있기 때문에 눈을 통한 공정의 점검이나 검사장비 부착이 용이함.
- 적은 숫자의 부품사용으로 인해 장비제작비용이 감소됨.

롤러는 제작방법에 따라 크게 dead shaft roller live shaft roller 두 가지로 나뉜다. Dead shaft roller의 축(shaft)은 고정되어 있으며 베어링을 통해 외삽되는 shell 부분만 회전하게 된다. Fig. 1은 dead shaft roller인 외팔보 형식 아이들 롤러의 설계도이다. 벽에 고정되는 외팔보 형식 축의 양 끝단에 베어링이 각각 삽입되며 이 베어링에 튜브 형상의 shell이 외삽된다.

이에 반해 live shaft roller의 경우 shell과 축이 볼트나 용접에 의해 체결되게 되며 축과 shell이 함께 회전하게 된다. 따라서, 모터 등을 이용한 구동이 가능한 롤러 형식이다. Fig. 2는 live shaft roller인 그라비아 인쇄용 제판롤이다. 중심축과 그라비아 인쇄용 패턴이 새겨진 실린더가 용접으로 체결되어 있으며 베어링이 중심축 양 끝단(edge)에 삽입되어 인쇄장비에 부착된다.

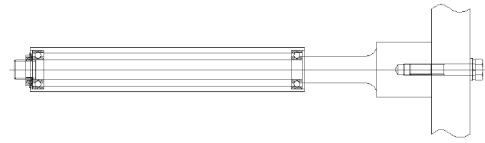


Fig. 1 Design of cantilever type idler roller; dead shaft roller

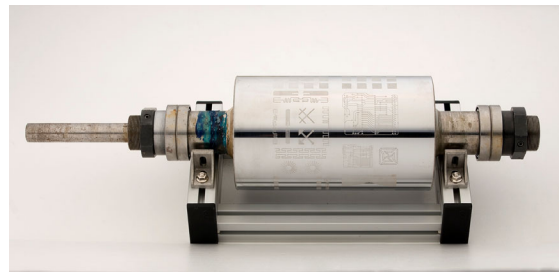


Fig. 2 Plate cylinder for gravure printing; live shaft roller

회전관성에 따른 웹 구동용 모터에 걸리는 부하를 줄이기 위해 아이들 롤러를 dead shaft roller 형식으로 제작하는 경우가 일반적이다. 또한 dead shaft roller는 축, shell, 베어링 등을 체결하는 과정에서 더 높은 정밀도와 추가 제작공정을 요구하는 live shaft roller에 비해 제작비용이 낮다는 장점이 있다. 본 논문의 주제인 굽힘에 대한 dead shaft roller의 강성은 롤러의 지름과 폭에 연관되어 있는데, 보다 정확하게는 축의 지름이 클수록, 폭이 짧을수록 강성이 높아진다.<sup>4</sup>

롤러의 굽힘(deflection)은 크게 3 가지 이유로 발생한다. 롤러 자중에 의한 굽힘, 웹 장력에 의한 굽힘, 닙(nip)에 의한 굽힘으로 분류할 수 있다. 본 논문에서는 이 중에서 웹 장력에 의한 굽힘에 대해 살펴보도록 한다. 롤투롤 공정에서는 웹을 이송시키기 위하여 웹에 장력(web tension)을 걸게 된다. 웹 상의 장력에 의해 아이들 롤러의 굽힘이 발생되는데, 롤러의 굽힘 때문에 웹에 주름(wrinkle)이 진다던가 웹 상의 장력이 불균일하게 되는 등의 단점이 있어 굽힘의 정도를 줄이는 것이 중요하다.<sup>3</sup>

롤러의 굽힘과 관련되어 롤투롤 공정을 주로 다루는 산업계에서 사용되는 기준을 Table 1에 정리해 보았다. 적용기준은 롤러 정밀도의 중요성 여부에 따라 크게 4 개의 등급으로 나뉘게 되는데, 최대 허용 가능한 굽힘은 롤러의 전폭 대비 최대 굽힘량으로 계산된다.

Table 1 Maximum allowable roller deflection

	Class A	Class B	Class C	Class D
% width	0.008	0.015	0.030	0.060

Table 1 에서 Class A 기준은 정밀(precision) 또는 넓 롤러용이다. 인쇄전자용 롤투롤 인쇄기는 정밀도가 우선시 되어야 하므로 인쇄전자에 사용되는 롤러는 Class A 의 기준을 만족시켜야 한다. Class B 는 고정밀 롤러가 아닌 일반 롤러에 적용되는 기준이며 Class C 는 티슈, 직물과 같이 탄성력 높은 웹 용이며 Class D 는 언와인더/리와인더와 같이 고정밀도를 요구하지 않는 롤러에 적용되는 기준이다.<sup>5</sup>

외팔보 형식 아이들 롤러의 굽힘은 간단한 수식으로 예측할 수 있다. 아래 수식은 beam theory 를 응용하였으며 아이들 롤러에 균일한 장력이 걸려있다고 가정하였다. 최대 굽힘량( $\delta_{max}$ ) [m]은

$$\delta_{max} = \frac{wl^4}{8EI} \quad (1)$$

와 같이 표현된다. 여기서  $w$  는 웹 장력에 의한 균일로드 [N/m],  $l$  은 롤러의 폭 [m],  $E$  는 영률 (Young's modulus) [N/m<sup>2</sup>],  $I$  는 2 차 면적모멘트 (Second moment of area) [m<sup>4</sup>]이다. (1)을 이용하여 간단하게 롤러의 굽힘을 예측할 수 있지만, 롤러 제작시 여러가지 재료가 쓰이고 구조가 복잡하여 2 차 면적모멘트를 구하기가 쉽지 않으므로 이 수식은 참고용으로 쓰는 것이 적합하다. 실제 굽힘량을 알기 위해서는 실험이나 유한요소 해석법을 통한 검증이 필요하다.<sup>6</sup>

외팔보 형식 아이들 롤러의 굽힘은 롤러간의 정렬(alignment)에 영향을 주게 된다. 양팔보 형식 아이들 롤러의 경우 굽힘이 일어나더라도 굽힘이 롤러 중앙을 축으로 대칭적으로 일어나기 때문에 정렬에 큰 영향을 주지 않는다.

정렬되지 않은 외팔보 형식 아이들 롤러는 롤투롤 공정에 크게 2 가지 영향을 끼치게 된다. 첫째로, 웹은 정상상태(steady state)를 가정하면 롤러와 수직으로 정렬되어 흐르는 성질이 있기 때문에 Fig. 3 에서 보는 바와 같이 진행중인 웹은 횡방향(x-direction)으로 이동되게 된다.<sup>7</sup> 롤러 간 정렬이 되지 않았을 때의 이동량은  $X_0$  로 표현해볼 수 있으며, 횡방향의 웹 이동을 고려하여 롤투롤 장비

를 설계하여야 장비의 목표 정밀도를 달성할 수 있다. 이에, 외팔보 형식 아이들 롤러를 채용한 장비에서는 끝단을 이용하여 웹의 횡방향 위치를 제어하는 web guiding unit 의 중요성이 커진다. 둘째로, 웹의 장력이 균일하지 않게 될 수 있다. 웹 장력이 고르지 않을 경우 웹이 처진다던가(sagging) 인쇄면이 고르지 않게 되는 현상이 발생할 수 있다. 기능성 있는 전자소자를 생산하기 위한 인쇄 전자 생산공정에서 고르지 않은 인쇄면은 소자의 성능을 떨어뜨리는 주범이다.

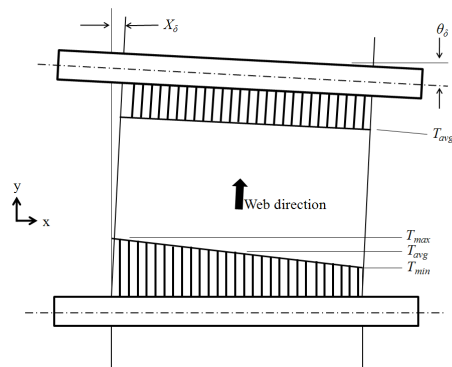


Fig. 3 Web bending due to misaligned rollers

외팔보 형식 롤러가 야기하는 단점이 있음에도 불구하고 여러 이점이 있어 많은 롤투롤 공정장비가 외팔보 형식 아이들 롤러를 사용하고 있다. 본 논문에서는 외팔보 형식 롤러의 장점을 유지한 채로 단점을 보완할 수 있는 방안을 살펴본다.

롤러의 굽힘강성을 높여 굽힘량을 줄이는 방법 중 가장 쉬운 방법은 단순히 롤러의 지름을 늘리는 것이다. 그러나, 롤러의 지름을 늘리게 되면 롤러의 전체적인 무게가 증가하며 재료비와 가공비 또한 높아진다. 또한, 높아진 회전관성으로 인해 모터에 더 많은 부하가 걸리게 된다는 단점도 있다.

롤러의 지름을 증가시키지 않으면서, 롤러간의 체결을 통해 굽힘에 대한 강성을 증가시키는 방법을 생각해볼 수 있다. 웹 장력에 의해 아이들 롤러에 일정량의 힘이 가해지게 되는데, 수 개의 롤러를 힘의 방향과 크기를 생각하여 서로 상쇄될 수 있는 방향으로 지지구조를 설치하여 결합하는 방안을 생각해볼 수 있다.<sup>8</sup> 이 때 가장 중요한 것은 웹 장력이 각 롤러에 미치는 힘의 합을 최소화 하는 방안으로 롤러간 체결을 하는 것이다. 아래

의 Fig. 4 는 그러한 방법을 표현한 그림이다. 웹의 장력에 의해 Roller 1 과 Roller 2 에는  $F_1$  과  $F_2$  의 힘이 걸린다. 이 두 개의 롤러를 하나의 bracket 을 통해 결합시켜 줌으로써  $F_1$  과  $F_2$  의 합력을 0 으로 만들어 줄 수 있다. 본 논문에서는 이러한 롤러간 체결방식의 지지구조의 유효성을 수치해석과 실험을 통해 증명하고자 한다.

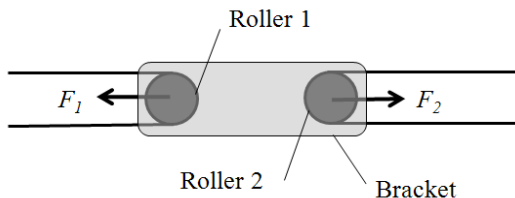


Fig. 4 Connected roller for zero net force

## 2. 지지구조의 해석 및 실험

본 장에서 롤러간의 체결을 통해 굽힘에 대한 강성을 높이는 지지구조의 실효성을 유한요소해석과 실험을 통하여 알아보도록 한다. 유한요소해석에는 상용 유한요소해석(FEM) S/W 인 COMSOL Multiphysics 4.0a 가 사용되었으며 롤러 굽힘의 실험에는 레이저를 이용한 고정밀 거리계가 사용되었다. 해석과 실험에 사용된 롤러의 구조나 웹 경로는 외팔보 형식 아이들 롤러를 채용하는 것으로 개발된 볼투볼 인쇄기의 것을 이용하였다.

### 2.1 지지구조의 유한요소해석

지지구조의 효용성을 알아보기 위하여 앞서 서론에서 살펴본 Class A 의 기준을 만족하는데 다소 미흡한 롤러를 사용하였다. 롤러의 치수나 디자인은 실존하는 롤러를 사용하였으며 롤러의 디자인을 변경하지 않은 채로 지지구조의 유무를 해석의 변수로 설정하였다. 지지구조는 두께 9 mm 의 플레이트로 만들어졌으며 롤러 축과 지지구조는 일반구조용 강재(A36)를 사용하였다. 이 재료의 영률은 200 GPa 이며 각 롤러에는 균일한 힘이 가해진다고 가정하였다.

해석을 위해 총 세 가지 경우의 롤러구조를 준비하였다. Fig. 5 에 나타난 대로 (a)외팔보 형식 롤러 홀로 있는 경우, (b)롤러에 가해지는 합력이 0 이 되는 이상적인 경우와 (c)합력을 0 으로 만들지 못하여서 중간지지대를 설치한 현실적인 경우이다.

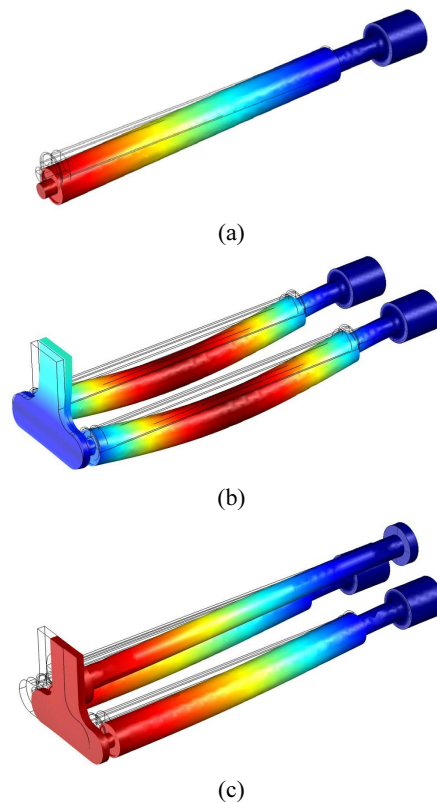


Fig. 5 Finite element analysis of (a) cantilever type idler roller deflection (b) ideal supported cantilever type idler rollers deflection (c) real supported cantilever type idler rollers deflection

(a)안의 경우 1 개의 아이들 롤러가 외팔보 형식으로 벽에 고정된 형태를 모델링한 것이다. 고전적인 beam theory 에서 외팔보의 변형이 일어나는 모습을 보여주는 것을 알 수 있다. 이러한 경우 서론에서 언급한 롤러간의 정렬과 관련된 문제가 일어날 수 있다.

(b)안의 경우 네 개의 외팔보 형식 아이들 롤러가 롤러간 결합용 지지구조물의 중심을 대칭으로 벽에 고정되어있는 형태이다. 합력이 0 이 되도록 롤러간 체결을 하였기에 한 끝단만 벽에 고정된 구조임에도 불구하고 양쪽 벽에 고정된 것과 같은 효과를 보여주는 것을 알 수 있다.

(c)안의 경우 네 개의 외팔보 형식 아이들 롤러가 사용된 것은 (b)안과 동일하나 롤러에 걸리는 힘의 합이 0 이 되지 않은 경우이다. Fig. 6 의 상황을 모델링한 경우로 (a)안과 (b)안의 혼합형임을

알 수 있다.

해석결과를 Table 2 에 정리하였다. 일반적인 사용영역인 100 N/m 내지 300 N/m 의 웹 장력에서 (a)안의 구조물은 충분한 성능(< 0.008%)이 나오지 않는 것을 볼 수 있다. 이상적인 안인 (b)안의 경우 모든 영역에서 기준을 만족하며 현실적인 (c)안의 경우도 대부분의 영역에서 기준을 만족함을 볼 수 있다.

Table 2 Finite element analysis results of maximum roller deflection compared to roller width

Web Tension	Case (a)	Case (b)	Case (c)
100 N/m	0.027%	0.001%	0.003%
200 N/m	0.053%	0.002%	0.006%
300 N/m	0.080%	0.003%	0.009%

2.2 지지구조의 유효성 실험

유한요소해석을 통하여 검증된 지지구조를 실제실험용 톨투를 공정장비에 적용하였다. 실제 장비에 장착된 모습은 Fig. 6 에 나타나 있으며 (c)안과 동일한 구조이다.

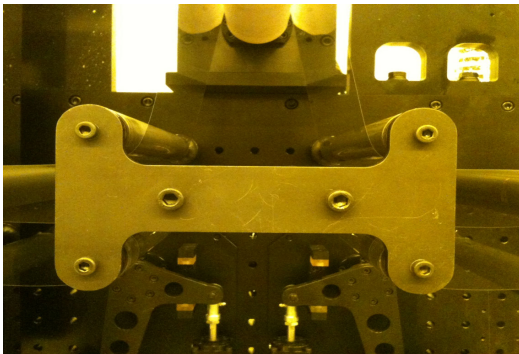


Fig. 6 Support for cantilever type idler rollers

롤러의 실제 굽힘량을 측정하기 위하여 고정밀 레이저 거리계(Keyence LK-H152)를 사용하였다. 본 실험에 사용된 센서의 분해능은 0.5 μm 이며 센서와 측정하고자 하는 물체의 거리를 잴 수 있다. 먼저, 장력이 0 N/m 일 때 센서와 롤러 사이의 거리를 제어 이 때의 거리를 reference 값으로 정하여 굽힘량이 0 인 것으로 가정한다. 이후 웹을 이송시키며 장력이 각각 100 N/m, 200 N/m, 300 N/m 인 경우에 센서와 롤러 사이의 거리를 잰다. 이 때의 거리 값을 reference 값에서 빼어 실제로 롤러의 굽힘량이 얼마인지 측정한다. 레이저 거리계를 이용

한 실험 장면은 Fig. 7 이며 실험의 결과는 Table 3 에 요약되어 있다. 실측결과가 Table 2 의 모델링을 통한 유한요소해석결과와 유사함을 알 수 있다.

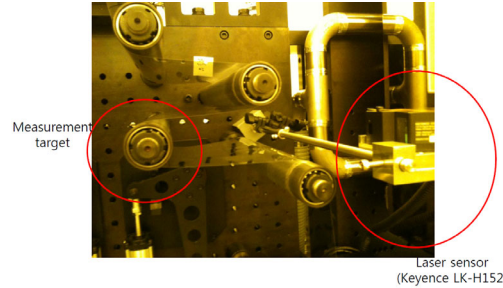


Fig. 7 Experimental setup to measure deflection of cantilever type idler roller

Table 3 Experimental measurement of maximum roller deflection compared to roller width

Web Tension	Case (a)	Case (b)	Case (c)
100 N/m	0.026 ±	0.002 ±	0.002 ±
	0.003%	0.002%	0.002%
200 N/m	0.048 ±	0.002 ±	0.004 ±
	0.004%	0.002%	0.002%
300 N/m	0.076 ±	0.003 ±	0.008 ±
	0.003%	0.003%	0.002%

3. 결론

인쇄전자를 위한 톨투를 인쇄기는 기능성 잉크를 사용하여 기능성 있는 소자를 생산하여야 하므로 높은 정밀도를 요구한다. 정밀한 인쇄를 위하여 각 요소부품의 정밀도가 구현되어야 하며 아이들 롤러 역시 예외가 아니다. 본 논문에서는 외팔보 형식 아이들 롤러의 굽힘에 대한 강성을 살펴보고 강성의 부족함을 보완할 수 있는 지지구조에 대하여 논하였다. 향후, 톨투를 인쇄기를 설계/제작할 때에는 설계/제작자가 간과하고 넘어가기 쉬운 요소부품들의 정밀도를 미리 알고 정밀도를 높일 수 있는 방안으로 장비를 설계/제작하여야 한다.

후 기

본 논문은 지식경제부 산업원천기술개발사업으로 지원된 연구결과입니다. (과제번호 : 10030065, RFID 태그 제작을 위한 인쇄공정 및 장비기술개발)

## 참고문헌

1. VDMA, "OE-A Roadmap for Organic and Printed Electronics, 3<sup>rd</sup> Edition," 2009.
2. Kim, M., Kim, C., Kim, D., Lee, T., Ryu, B. and Choi, B., "Development of Roll-to-Roll Printing Equipment for PEMS Production," Proc. of the Korean Society for Precision Engineering Spring Conference, pp. 973-974, 2008.
3. Kim, C., Kim, M., You, H., Choi, B., Lee, S. and Kim, D., "Roll-to-Roll Contact Printer with Multiple Printing Methods," Journal of the Korean Society for Precision Engineering Vol. 27, No. 9, pp. 7-10, 2010.
4. Kim, M., Kim, D. and Kim, C., "A Study on the Relationship between the Shaft Diameter and Length for Cantilever Type Idle Roller in Roll-to-roll Printing System," Proc. of the Korean Society for Precision Engineering Spring Conference, pp. 593-594, 2009.
5. Roisum, D., "The Mechanics of Rollers," Tappi Press, pp. 30-38, 1996.
6. Yoon, D., Lee, S. and Kim, D., "Mitigating Idler Roller Bending in Roll-to-roll Process," Proceedings of the 4th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology, pp. 215-216, 2011.
7. Shelton, J. and Reid, K., "Lateral Dynamics of an Idealized Moving Web," ASME J. Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 93, No. 3, pp. 187-192, 1971.
8. Yoon, D., Lee, S., You, H. and Kim, D., "Support Structure for Cantilever Type Idler Rollers of Roll Printing Apparatus for Printed Electronics," Korea Patent, No. 10-1038719, 2011.