

Roll to Roll 공정상의 유동장 계측 및 공기유입

김성균[†] · 박준형* · 흰광림*

Research on the Airflow and Air Entrainment on Roll-to-Roll System

Sung-kyun Kim, Joon-hyung Park and Huynh Quang Liem

Abstract. The Roll-to-Roll system including continuous flexible thin materials and roller has its wide range of applications especially in the electronic printing industry. The industry is growing rapidly and the printing speed is also improving. However, the printing machine based on web and roller system has its own problem. As the web speed increases, the failure to maintain the contact may occur and the air entrain between the roller and the paper web may exist. Air bubbles may remain attached to electronic ink on the web causing defects on product surface. With the development of image processing technique, the airflow around the web and rolls can be visualized and calculated by PIV method. In our experiment, the simple web and rolls system is used to R2R simulator. The flow field is studied at various web speeds and positions. The result shows that the flow field has complicated structure with turbulent characteristic and the main trend of flow is obtained by taking time average of flow field.

Key Words: R2R system(연속생산공정), Electronic printing(전자인쇄), PIV(입자영상유속계), Flow visualization(유동가시화), air-entrainment(공기유입)

1. 서 론

종이, 섬유, 사진필름(Photographic film), 자기 테이프(magnetic tape)를 비롯하여 RFID, 전자종이(E-Paper), PLED(Polymeric LED), OLED(Organic LED) 등 유연성 소재를 사용하여 전자인쇄를 할 수 있는 소재를 웹(WEB)이라고 부른다. 이러한 웹 소재를 사용한 저가의 전자부품들이 전 세계적으로 새로운 시장을 열 것으로 예측되고 있는 가운데, 현재까지의 소규모 단계적 생산기술을 극복하고 연속생산기술(Roll to Roll Technology, R2R)에 의한 전자인쇄 시스템을 통하여 안정적으로 균일한 품질의 제품을 대량생산하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이러한 연구의 일환으로 다양한 상황에서의 임계 속도(critical speed)를 구하기 위한 연구^(1,2)와, 표면의 거칠기에 따른 공기 유입현상에 관한 연구⁽³⁾가 진행되었다. Yugang Li⁽⁴⁾

등은 움직이는 웹의 진동을, Y.Watanabe⁽⁵⁾는 웹의 떨럭거림(flutter)현상의 연구를 위해 실험을 수행하고 가시화 하였다. 또한 A. Kulachenko^(6,7)등은 수치해석을 통하여 이송되는 웹과 시스템의 작용을 연구하는 등 R2R 공정속도를 높이기 위한 활발한 연구가 진행되고 있다.

하지만 공정 속도가 높아질수록 단가는 낮아지는 R2R방식에서, 속도가 증가할수록 공기유입(Air entrainment)의 증가로 인해 웹과 롤러 사이의 미끄러짐(slippage), 부유현상(floating), 비틀림(buckling), 주름(wrinkling) 등의 여러 저해요소로 인하여 생산된 제품의 품질을 떨어트리는 일이 발생하게 된다. 그러므로 R2R 개발공정 연구에서는 더욱 빠른 속도의 생산을 하기 위해서 공기유동에 대한 연구가 진행 되어야 한다. A.Arzate⁽⁸⁾는 공기유동에 대한 경계층의 지배방정식을 이송되는 웹에 맞도록 적용하고, 고속비디오카메라와 할로겐 램프를 이용하여 다양한 속도에 대해 이송되는 웹의 경계층 측정에 대한 실험을 수행하였다. Jae Yong Lee⁽⁹⁾은 롤러와 웹 사이의 간격을 계산하기 위한 foil bearing equation⁽¹⁰⁾, Hydrodyna -mic Model⁽¹¹⁾, Elasto-

[†]건국대학교 기계공학과
E-mail : sungkim@konkuk.ac.kr
*건국대학교 기계공학과 대학원

hydrodynamic Model⁽¹²⁾을 통하여 여러 조건에서 공기 유입으로 인한 웹의 떠오름(ballooning) 현상을 수치해석을 통한 연구를 하였다.

하지만 이러한 연구를 통해서도 웹과 롤러 사이 틈새의 입구(inlet)와 출구(outlet) 부근에서의 공기유입에 대한 기본적인 메커니즘을 찾기에는 아직 부족하다. 특히 공정속도가 빨라질수록 공기유입현상이 직접적으로 일어나는 입구지역에서의 공기유동현상해석은 절대적으로 필요로 해 보인다. 이를 위해서 본 연구에서는 웹과 롤러 주위를 관찰할 수 있는 R2R 시뮬레이터를 제작하고, 입자영상유속계(Particle Image Velocimetry, PIV)기법을 통하여 유동가시화 및 속도장 계측을 수행하였다.

2. 실험 기법 및 장치

2.1 R2R Simulator

웹과 롤러 사이의 공기유동에 영향을 주는 주요 변수로 ①롤러의 반지름 ②롤러와 웹이 만나는 각 ③웹에 작용하는 장력 ④웹의 속도 ⑤웹의 재질 ⑥웹에서의 위치 등이 있다. 이와 같은 변수를 변화시키며 실험을 할 수 있도록 R2R 시뮬레이터(Fig. 1)를 고안 및 제작하였다.

직렬 모터(D.C. Motor)에 의해 작동하는 구동롤러(Fig. 1의 1)에 의해 전체 시뮬레이터가 작동하도록 제작하였고, 웹에 걸리는 전체적인 장력을 제어하기 위하여 Fig. 1의 2번 롤러에 장력게이지(tension gage)를 2개 장착 하였다. 웹과 롤러 사이의 유동을 관찰하게 될 롤러는 Fig. 1의 3번 롤러로써 그 개략도는 Fig. 2와 같다. 3, 4번 롤러의 위치를 조정함으로써, 각도(θ)를 변화시킬 수 있도록 하였다. 모든 롤러들의 반경 R은 20 mm, 길이는 300 mm이며, 롤러에 홈이 없는 non-groove 롤러를 사용하였다. 롤러의 nip-force는 0

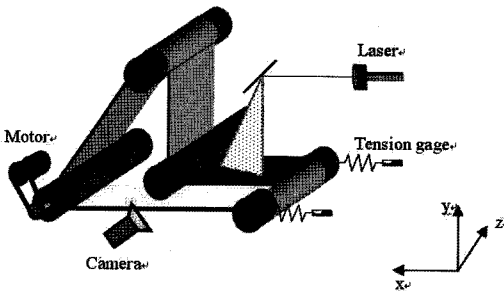


Fig. 1. R2R Simulator

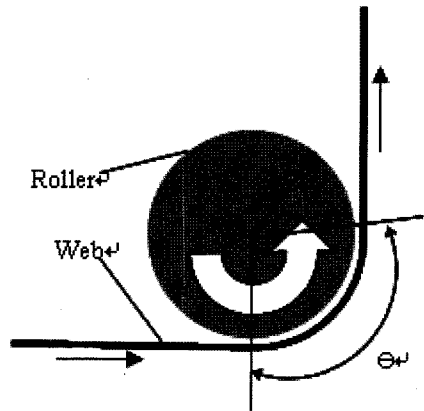


Fig. 2. Sketch around the roller

Table 1. Properties of Motor, Tension gage and Web

Web	Speed	
	Motor speed [RPM]	Web velocity [MPM]
· Polyester(PET)		
· Width: 200 mm		
· Thickness: 12E-6m	250	31.4
· Young's modulus: 3.6E9 N m ²	500	62.8
· Poisson ratio: 0.4	750	94.2
	1000	126.7
	1250	157.1

N, θ 는 90°로 설정하여 이번 실험을 수행하였다. 웹의 특성(property)은 Table 1과 같다.

2.2 PIV(Particle Image Velocimetry) 실험

PIV 기법은 짧은 시간간격 Δt 동안 움직인 추적 입자들의 변위정보를 화상입력장치에 저장한 후, 디지털 화상처리기법을 이용하여 입자들의 변위를 계산하고 이를 시간간격 Δt 로 나누어 줌으로써 속도벡터를 추출하는 방법으로, 컴퓨터 및 화상처리 기술의 발전에 힘입어 복잡한 열 유동 문제의 규명 및 유동구조의 물리적 진단에 있어서 가장 효과적이고 강력한 계측방법 중 하나이다.

본 연구에서 PIV해석을 위한 유동가시화 실험장치의 개략도는 Fig. 3과 같다. 최대 150 mJ/pulse의 이중광원(Double source) Nd:YAG 레이저(SPECTR-ON Co.)와 최대해상도 1280*1024 pixels, 1 μ sec. 이상 시간 간격의 한 쌍의 영상들을 초당 8쌍까지 처리 가능한 CCD 카메라(LaVision Co. Flow Master 3), 선택투과필터(band-pass filter)를 부착한 매크로렌즈(AF 105 mm F2.8 Nikon Lens), 레이저를 동조시키기 위한

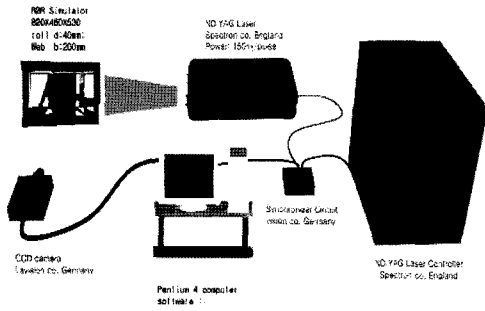


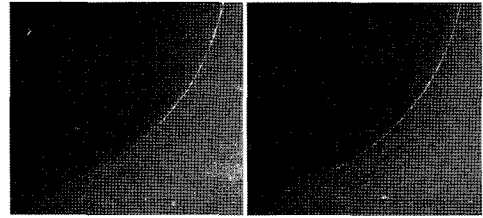
Fig. 3. Experimental set-up

컨트롤러를 사용하였다. 입자는 1 μm 크기의 올리브 오일 버블을 사용하였으며, 밀폐된 박스 내에 공급한 후 실험하였다.

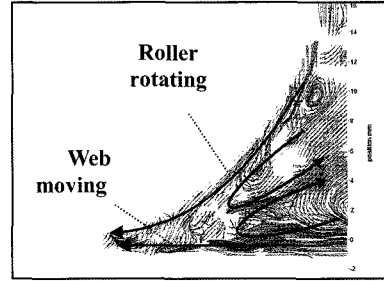
실험은 다양한 웹의 이송 속도와, 웹 상의 여러 단면에서 수행하였다. 레이저 시트(Laser sheet)는 컨트롤러에 의해 이미지 사이 간격 Δt 30 μs로 하였고 512 개의 이미지 세트를 촬영하여 평균 유동장을 계산하였다. 250RPM 부터 1200RPM까지 다양한 모터속도조건에서 수행하였고, 웹 상의 수직단면(x-y plane)들을 웹 중앙에서 웹의 가장자리 밖 10 mm까지 10 mm 간격으로 측정하였다. 웹의 끝 단 영역의 x-z plane의 유동을 관찰하기 위하여 웹 표면에 평행한 면에서도 측정하였다.

3. 결과 및 토론

Katsumi Aoki(13)는 롤러와 웹 사이의 유동을 관찰한 논문을 발표하였으나, 유동을 이해하기 위해서는 더 낮은 정밀도를 갖은 측정이 필요로 해 보인다. 본 연구에서는 롤러와 웹 사이의 유동을 관측하기 위하여 약 25 mm*20 mm 이하의 도메인 크기로 계측하였다. Fig. 4의 (a), (b)는 모터속도 250rpm, 40mm 위치에서 30 μs 간격의 임의의 한 쌍의 이미지이고, (c)는 두 이미지에 대한 PIV해석에 의한 순간속도장을 보여준다. 유동장에서는 산발적으로, 그리고 간헐적으로 와류가 생성되는 등 난류의 특징을 보여주고 있으며, 웹 이동속도가 증가할수록 더 잘 나타난다. 유동의 전체적인 경향은 굵은 선으로 표시한대로 롤러와 웹에 의해 움직이는 유동과 이들이 모여 대각선 방향으로 돌아 나오는 제트유동이 모든 결과에서 공통적으로 보인다. 512개의 순간 속도장들을 평균한 속도장, 유선, RMS들을 Fig.

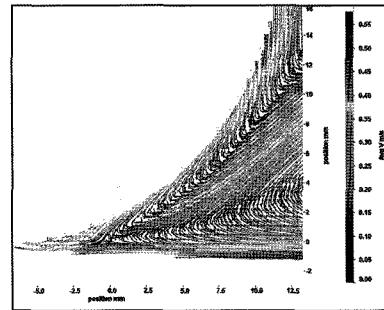


(a) Raw image 1 (b) Raw image 2

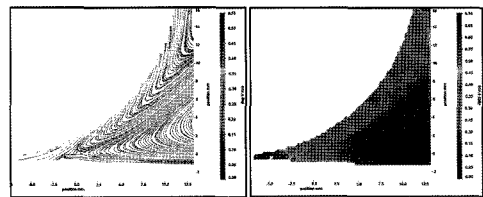


(c) Velocity vector field and flow pattern

Fig. 4. Instantaneous velocity field: 40mm from the web edge, 250rpm



(a) Average vectors



(b) Stream line (c) R.M.S.

Fig. 5. Average velocity field:40mm from the web edge, 250rpm

5에 나타내었다. 평균 속도장에서는 몇 가지 영역이 보여지고 있다. 먼저 웹과 롤러의 표면 근처에서는 얇은 층들이 존재한다. 웹이나 롤러의 표면에서 최대속도 (No slip condition)를 갖게 되며, 표면으로부터 멀어질수록 속도가 빠르게 감소하는 경계층 유동의 형태를

뜨게 되며, 웹과 롤러가 만나는 영역에서 두 유동의 극히 일부는 갭(air film thickness)을 통하여 빠져나가고 대부분의 유동은 충돌하여 합쳐져서 대각선방향으로 jet유동의 형태로 돌아 나온다. 전체적으로 평균유동은 싱크(Sink)와 움직이는 썬기 영역으로 형성된 변형된 Jeffery-Hamel유동의 특징을 갖는다. 그러나 여기서 발생하는 제트유동은 난류유동이며, 두 경계층의 충돌로 유동구조가 더욱 불안정 하여 복잡한 유동형태를 지닌다.

R2R공정에서는 갭을 통과하는 유동이 중요하며 웹의 이동속도(롤러의 회전속도)와 장력에 따른 공기 유입량(air entrainment)을 이를 측정하는 것이 본 연구의 중요한 목표 중 하나이며, 웨지 부근의 국소 영역에 대한 PIV유동해석 결과로부터 공기 유입량을 계산하였다.

Fig. 6은 웹 이동속도를 변화에 따른 웹과 롤러 주위의 유동(웹의 중앙단면에서)에 대한 PIV결과들이다. 그림에서 보이듯이 R2R 시뮬레이터의 작동속도가 빨라질수록 유동속도가 증가하고, 웹과 롤러에 의해 발생하는 경계층의 두께가 작아짐을 볼 수 있다. Table 2는 Fig. 6의 PIV결과를 토대로 계산한 웹과 롤러 사이의 평균공기유입량 결과이다. 시뮬레이터의 작동속

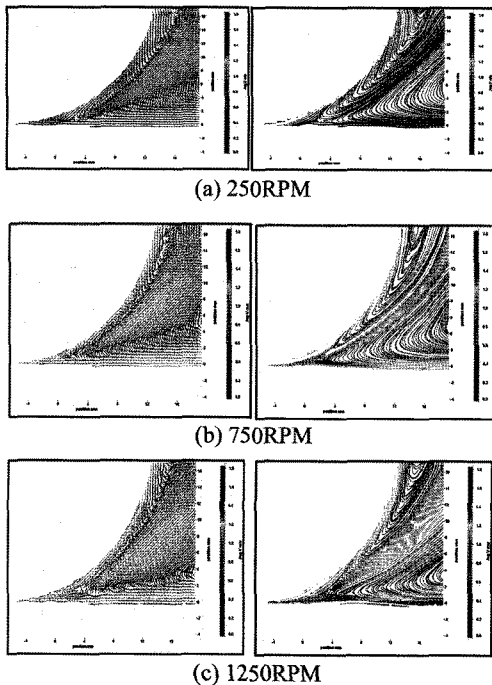


Fig. 6. Average vectors and stream lines: Various Web speeds on center area of Web

Table 2. Air entrainment versus web speed for a unit thickness at a fixed tension

RPM	Web speed(MPM)	Air entrainment (m ² /s)
250	31.4	0.00012
500	62.8	0.00024
750	94.2	0.00035
1000	126.7	0.00037
1250	157.1	0.00043

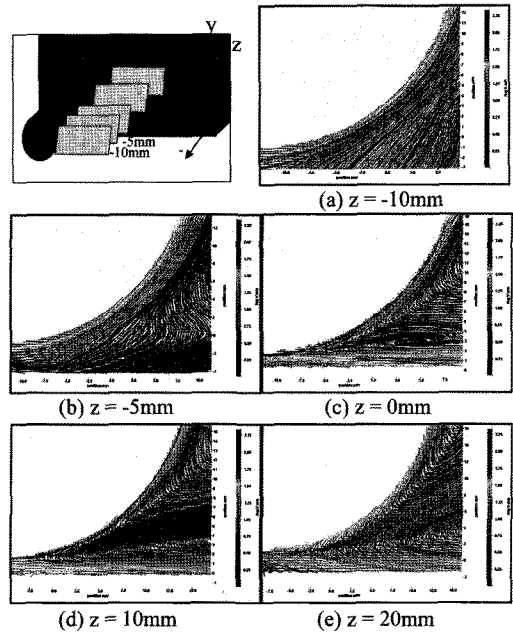


Fig. 7. Flow distribution on vertical planes along the web with: 1000RPM

Table 3. Air entrainment versus web position for a unit thickness at a fixed tension: 250RPM

Web position(mm)	Air entrainment(m ² /s)
0	0.000121
10	0.000107
20	0.000107
30	0.000110
40	0.000123

도가 빨라질수록 두 층을 통해 들어오는 유량이 증가함을 볼 수 있다.

Fig. 7은 웹 끝단 바깥 10 mm에서부터 웹의 안쪽으로 단계적으로 측정된, 웹과 롤러 주위 유동에 대한 다양한 속도분포를 나타낸 그림이다. Fig. 7의 (a)에서 보듯이, 웹의 바깥 10 mm에서는 웹에 의한 유동구조는 거의 보이지 않고 롤러에 의한 유동만 보인다. 5 mm 밖 단면(b)에서부터 웹 유동의 영향이 나타나기

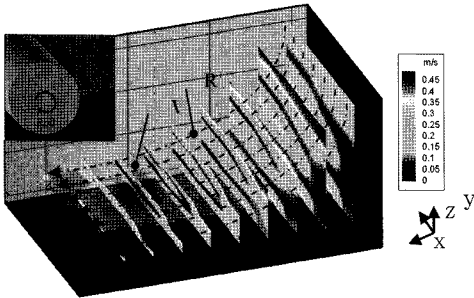


Fig. 8. 3D view of flow over web and roll system: 250RPM

시작한다. 웹의 끝 단인 (c)의 경우 jet유동과 웹에 의한 유동이 갑자기 만남으로 인 하여 큰 와류가 생성이 된다. 그 이후 웹에 의한 유동이 완전히 발달하지 못한 10 mm 안쪽 단면(d)에서는 jet유동이 적은 각도로 형성되며, 20 mm 단면(e)에 이르면 웹에 의한 유동이 완전히 발달하여 jet유동은 웹의 중앙지역과 동일한 각도로 나가는 것을 볼 수 있다. 20 mm 이후 웹과 롤러 사이의 유동은 유사한 구조를 갖게 된다.

Table 3은 Table 2와 마찬가지로 방법으로 모터의 회전속도 250RPM일 때 웹 끝 단 부근의 영역에서의 공기유입량을 계산한 결과이다. 웹의 유동이기 진동에 의한 틈새의 불균일에 의해 유입량은 횡 방향으로 변화하며, 끝 단에서는 PIV 실험과정 중 웹의 내부뿐 아니라 웹의 외부까지 포함하여 계측이 되었기 때문에 공기유입이 크게 나타났다.

위의 결과들로부터 알 수 있듯이, 웹의 가장자리에서는 jet유동을 포함한 유동들은 2차원이 아닌 3차원 구조를 갖게 됨을 알 수 있다. Fig. 8은 2차원으로 측정된 결과들을 3차원화하여 나타낸 그림으로 웹의 가장자리에서의 유동을 잘 표현해 주고 있다. 웹의 끝 단 부근 유동의 3차원 구조를 알아보기 위해, 웹에 평행한 방향(x-z plane)으로 웹에 의해 발생하는 경계층 내부의 유동을 계측한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 롤러에 근접한 유동들은 롤러에 의한 경계층과 만나게 되는 지역임으로 다른 유동들과는 달리 난류 유동의 특징을 보여주고 있다. 웹의 가장자리에서부터 약 -3 mm까지의 유동은 웹의 진행방향과 동일하게 진행이 되지만, -5 mm부터 웹의 바깥부분은 웹의 내부의 유동보다 크기가 작고 웹의 바깥방향을 향하고 있음을 볼 수 있다.

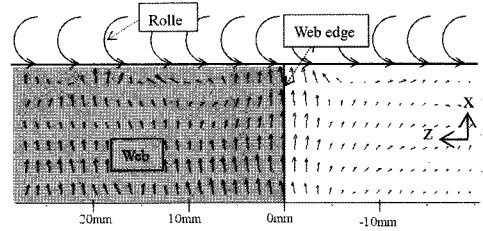


Fig. 9. Velocity field from plane view: 250RPM

4. 결 론

R2R 시뮬레이터를 제작하여 Roll-to-Roll 공정상의 웹과 롤러 사이의 유동장을 형성하고, PIV 기법에 의해 속도장과 공기유입량을 계산하였다. R2R 시뮬레이터는 롤러와 웹의 유동에 영향을 주는 변수를 제어하며 실험할 수 있도록 제작되었고, Nip-Force는 0 N, 롤러와 웹의 각 θ 는 90°로 설정하였다. R2R 시뮬레이터의 공정속도와 웹 상의 여러 위치에 따른 유동해석 결과는 속도벡터와 유선을 통한 그림으로 나타내었고, 각 경우의 공기유입량을 계산하여 도표로 나타내었다. 속도가 빠를수록 더 많은 공기유입이 있었고, 유동이기진동과 3차원 난류유동의 결과로 웹의 중간지역보다 가장자리에서 보다 적은 공기유입은 웹의 횡 방향으로 균일하지 않았다. 앞으로 웹과 롤러 사이의 입구(inlet)지역뿐만 아니라 출구(outlet)지역의 유동장 계측, 다양한 각도조건과 웹의 진동을 고려한 실험이 수행 되어야 할 것이다.

참고문헌

- 1) Barry Bolton and Stanley Middleman, 1980, "Air Entrainment in A Roll Coating System", Chemical Engineering Science, Vol. 35, pp 597~601.
- 2) R. BURLEY and R. P. S. Jolly, 1984, "Entrainment of Air into Liquids by A High Speed Continuous Solid Surface", Chemical Engineering Science, Vol. 39, pp 1357~1372.
- 3) Hadj Benkreira: The Effect of Substrate Roughness on Air Entrainment in Dip Coating, Chemical Engineering Science, Vol. 59(2004), pp 2745~2751.
- 4) Yugang Li, Dan Aron and Christopher D. Rahn, 2002, "Adaptive vibration isolation for axially moving strings: theory and experiment", The journal of IFC,

- Vol. 38, pp 379~390.
- 5) Y. Watanabe, 2002, "An Experimental Study of Paper Flutter", *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 16(4), pp 529~542.
 - 6) A. Kulachenko, P. Gradin and H. Koivurova, 2007, "Modeling the Dynamical Behavior of a Paper Web. Part I", *Computers and Structures*, Vol. 85, pp 131~147.
 - 7) A. Kulachenko, P. Gradin and H. Koivurova, 2007, "Modelling the Dynamical Behavior of A Paper Web. Part II", *Computers and Structures*, Vol. 85, pp 148~157.
 - 8) A. Arzate and P.A. Tanguy, 2004, "Air entrainment on a moving continuous web", *Chemical Engineering Science*, Vol. 59, pp 3527~3536.
 - 9) Jae-Young Lee, Chang, Y. B., Shelton, John J., 2002, "A Computational Analysis of Air Entrainment with a Nip Roller", *KOREA TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY*, 2002 Nov. 07, pp.81~90.
 - 10) Knox, K. L. and Seoney, T. L., 1971, "Fluid effects associated with web handling", *Industrial & Engineering Chemistry, Process Design & Development*, Vol. 10, No. 2, pp.201~205.
 - 11) Chang, Y. B., Chanmbers, F. W., and Shelton, J.J., 1994, "Air entrainment with a Force-loaded nip roller", *Web handling Research Center*, Oklahoma State University.
 - 12) Chang, Y. B., Chanmbers, F. W., and Shelton, J.J., 1996, "Elastohydrodynamic lubrication of air-lubricated rollers", *Journal of Tribology*, Vol. 118, No.3, pp.623~628.
 - 13) Katsumi Aoki and Hiromu Hashimoto, 2008, "Characteristics of Air Film Spacing and Flow Visualization for Transporting Film", *1st International Conference on R2R Printed Electronics 2008*, pp. 225~232.