

전자 인쇄에서의 인쇄 패턴 왜곡

김충환#, 이택민*, 김동수*, 최병오**

Distortion of Printed Patterns in Printed Electronics

Chung Hwan Kim #, Taik-Min Lee*, Dong Soo Kim* and Byung Oh Choi**

ABSTRACT

The distortion of printed pattern is frequently observed in gravure offset printing process, which can be a serious problem in printing process for printed electronics. The mechanism of pattern distortion is studied and the factors which affect the amount and shape of distortion are found using FEM. The amount and shape of distortion is influenced by material properties of the roller, thickness of roller, applied load, and so on. As the printing pressure increases and Possion ratio increases, the degree of the image distortion increases. And the increase of the thickness of rubber roller brings a large distortion of image, too. In some cases, the distortion of printed pattern can reach a few hundred micro-millimeters. The comparison of the experiment result and the simulation result shows good agreement in their quantitative tendency.

Key Words : Printed Pattern (인쇄 패턴), Distortion (왜곡), Printed Electronics (전자 인쇄), Printing (인쇄)

기호설명

- F = applied load to the roller
- G_n = nip deformation ratio
- R = radius of roller
- R_i = inner radius of rubber roller
- S_n = a half of the nip length
- S_0 = circumferential length of the roller before deformation corresponding to S_n
- S_p = magnitude of nip deformation
- Δy = width of image before deformation
- $\Delta \hat{y}$ = width of image after deformation

- μ = friction coefficient between roller and plate
- ν = Possion ratio

1. 서론

최근 RFID 태그, 센서, 유연성 디스플레이, 태양 전지, 전자 종이 등의 전자 소자를 프린팅 방식을 이용하여 생산하려는 연구가 많이 이루어지고 있다.^{1,2} 특히 이러한 제품들은 유비쿼터스 시대, 고가에너지 시대에 필수적으로 사용될 제품들이며 공통적으로 유연성을 필요로 하고 저가의 대량 생산을 필요로 하기 때문에 기존의 롤투를

접수일: 2007년 3월 9일; 게재승인일: 2007년 5월 31일
 # 교신저자: 한국기계연구원 정보장비연구센터
 E-mail: chkim@kimm.re.kr Tel. (042) 868-7948
 * 한국기계연구원 정보장비연구센터
 ** 한국기계연구원 지능형정밀기계연구본부

(Roll-to-Roll) 인쇄기 공정을 이용하여 생산하는 방식이 적합하다. 그라비아, 옵셋, 플렉소, 로터리 스크린 등 다양한 롤투롤 인쇄 공정 방식 중 그라비아 옵셋 인쇄 방식은 그라비아의 장점인 두꺼운 패턴이 가능하면서도 중간 전이체인 블랭킷(Blanket) 롤러를 사용하므로 그라비아에 비해 작은 인쇄압을 필요로 하기 때문에 다양한 기능성 잉크의 중첩 인쇄에도 기 인쇄된 패턴의 손상이 적어 전자소자 프린팅에 적합한 인쇄 방식으로 알려져 있다.³ 그라비아 옵셋 방식의 경우 블랭킷 롤러를 사용하여 피인쇄체에 전이하는 압력은 그라비아에 비해 크지 않지만 제판 롤러로부터 블랭킷 롤러에 잉크를 전이하기 위해서는 수~수십 MPa의 고압이 필요하며 특히 전이성이 떨어지는 전도성 메탈 잉크의 경우 더 큰 압력을 필요로 하기도 한다. Fig. 1은 그라비아 옵셋 방식으로 전도성 실버 잉크를 사용하여 인쇄된 패턴의 예로 인쇄 패턴의 왜곡(Distortion) 현상이 발생하였음을 알 수 있다.

이러한 왜곡 현상은 정밀한 인쇄를 요구하는 전자소자용 프린팅 공정의 경우 매우 큰 불량 요소로 작용할 수 있다. 따라서 이러한 왜곡의 원인과 영향을 주는 요소를 파악하고 민감도 해석을 통해 전자 잉크 전이 공정에 활용하고자 한다.

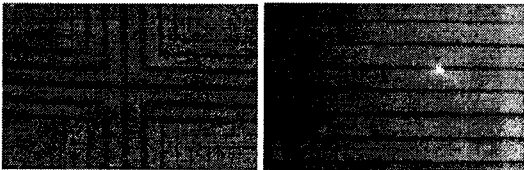


Fig. 1 Distortion of printed image obtained by gravure offset printing process using conductive silver ink

2. nip 폭/nip 변형률에 따른 인쇄 위치의 변화

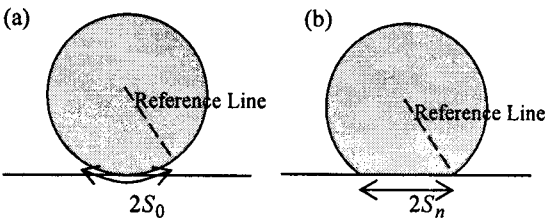


Fig. 2 Definition of S_n and S_0 , (a) before deformation (b) after deformation

Fig. 2에서와 같이 롤러의 변형 후 nip(nip) 폭의 반 S_n 과 S_0 을 형성한 롤러의 변형 전 원주 길이를 S_0 로 정의하였다. nip의 폭은 롤러의 재질, 하중, 마찰 등에 따라 달라지며 롤러의 폭 방향으로도 불균일한 nip 폭을 형성한다.

nip에서의 변형에 의한 속도 변화는 해석적으로 일부 연구가 있었고^{4,5}, Diehl⁶, Stack⁷ 등은 속도 비를 $\lambda = S_n/S_0$ 로 정의하여 롤러의 압력, 재질 등에 따른 nip에서의 속도 변화에 대한 다양한 데이터를 제시하였다. 이러한 속도 변화는 롤러의 포아송 비와 축 방향 변형 조건인 평면 변형(plane strain), 평면 응력(plane stress) 등에 따라 차이를 보여 동일 재질의 동일 두께의 롤러에서도 폭 방향으로 서로 다른 속도 변화를 보인다. 그러나 nip에서의 변형에 따른 패턴 왜곡 등의 연구는 거의 없다.

평판 또는 원통의 강체 제판으로부터 고무 재질의 블랭킷 롤러에 잉크의 전이가 이루어지는 프린팅 공정의 경우 nip의 폭 S_n 과 변형 전 원주 길이 S_0 에 따라 프린팅 위치가 달라진다. Fig. 3으로부터 S_n 과 S_0 에 따른 전이 위치의 차이를 정량적으로 고찰할 수 있다.

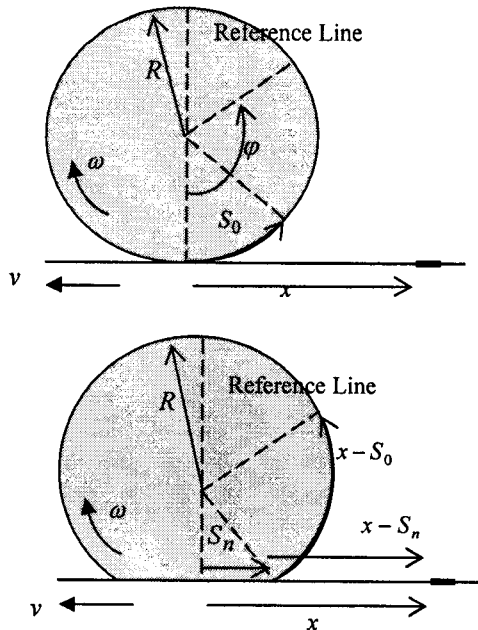


Fig. 3 Position change of ink transferred due to nip deformation

변형 전 제판의 x 의 위치의 패턴은 롤러의 $x = R\phi$ 의 위치의 기준점에 전이가 된다고 가정하면 S_n 의 넓을 형성할 경우 기준점과의 전이 위치 차이는 다음과 같이 주어진다.

$$x' = (x - S_n) - (x - S_0) = S_0 - S_n \quad (1)$$

따라서 패턴의 위치 변화는 다음과 같이 넓 변형량 S_p 로 정의할 수 있다.

$$S_p = S_0 - S_n \quad (2)$$

여기서 $S_p < 0$ 일 경우 패턴은 기준점보다 앞서게 되며 $S_p > 0$ 일 경우 패턴은 기준점보다 뒤쳐지게 된다. 따라서 롤러에서 폭 방향의 S_p 가 달라질 경우 동일 선상의 패턴은 뒤쳐짐과 앞섬 등의 위치 변화로 나타나며 이것은 곧 패턴의 왜곡 현상으로 나타나게 된다. 양의 S_p 만을 가지는 롤러에서 만약 롤러의 양끝 쪽으로 갈수록 S_p 가 커질 경우 직선으로 제판된 패턴은 인쇄 후 용지의 이송 방향으로 불룩한 왜곡된 패턴이 인쇄되며 반대로 S_p 가 롤러의 양 끝 쪽으로 갈수록 작아질 경우 용지의 이송 방향으로 오목한 왜곡된 패턴이 인쇄된다. 패턴의 왜곡은 폭 방향의 S_p 의 차이에 의해 나타나며 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \Delta S_p &= S_p^2 - S_p^1 = S_0^2 - S_n^2 - (S_0^1 - S_n^1) \\ &= S_0^2 - S_0^1 - (S_n^2 - S_n^1) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 2, 1 은 롤러의 서로 다른 위치를 나타내며 롤러의 위치에 따라 S_n 뿐만 아니라 S_0 도 달라진다. 만약 임의의 위치에서 S_0 이 같을 경우 $\Delta S_p = S_n^2 - S_n^1$ 로 주어지며 이 경우 넓의 크기 차이로 패턴의 왜곡이 나타난다. 따라서, 일반적으로 롤러의 위치에 따라 S_0 이 달라지므로 넓의 크기 차이가 패턴의 왜곡으로 나타나는 것은 아니므로 단순히 넓의 크기만을 고려하여 패턴의 왜곡을 예측할 수 없다. 이러한 넓 변형량은 평면의 제판이 아닌 원통형 제판의 경우에도 마찬가지로 정의된다. 또한 고무 롤러의 패턴이 다른 롤러나 종이 등에 전이 될 경우의 넓 변형량은 다음과 같이 정의된다.

$$S_p' = S_0 - S_m \quad (4)$$

여기서 S_m 은 블랑켓 롤러가 2 차 전이 시 형성하는 넓 폭이다.

따라서, 제판으로부터 고무 롤, 고무롤로부터 종이 등의 2 차 전이가 일어나는 경우 넓 변형량은 다음과 같이 정의 된다.

$$S_p'' = S_p + S_p' = S_n - S_0 + (S_0 - S_m) = S_n - S_m \quad (5)$$

식 (5)에서 피인쇄체 또는 가압 롤러가 제판(롤러)과 동일 물성과 동일 형상을 가질 경우 동일한 넓 폭을 형성하며 따라서 넓 변형량은 0 이 되어 전이 위치 변화는 없게 된다. 만약 블랑켓 롤러와 가압 롤러가 동일 물성과 동일 형상을 가질 경우 $S_p' = S_0 - S_m = 0$ 이 되어 2 차 전이 후의 넓 변형량은 1 차 전이 시의 넓 변형량과 같아지게 된다.

한편, 넓에서 잉크의 전이가 이루어질 경우 넓의 변형에 따른 이미지의 폭 변화는 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta y = \Delta y (S_0 / S_n) \quad (6)$$

따라서 위 식으로부터 전이된 패턴의 이득은 S_0 / S_n 에 비례함을 알 수 있다. 따라서 롤러의 폭 방향 위치에서의 넓 변형량 S_p 의 차이에 따라 잉크의 전이 위치가 달라지며 S_n 과 S_0 의 비율인 S_0 / S_n 에 따라 패턴의 이득이 달라진다. 이러한 이득의 변화를 결정하는 파라미터로 넓 속도 변화율의 역수를 넓 변형율 G_n 으로 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$G_n = S_0 / S_n \quad (7)$$

따라서, 본 논문에서는 롤러의 재료 특성, 하중 조건, 롤러의 형상 등의 조건에 따른 넓 변형량 S_p 와 변형율 G_n 의 롤러의 폭 방향 위치에서의 차이를 고려하여 잉크의 전이 위치 변화와 이득의 변화를 고찰하고자 한다.

3. 상용 유한요소 프로그램을 이용한 해석

넓 변형량 S_p 와 변형율 G_n 의 계산을 위하여 상용 유한요소 프로그램을 이용하였다. 인쇄 공정 중의 롤러 회전과 제판의 이송 등을 고려하기 위

해서는 동역학과 변형을 같이 해석할 수 있는 해석 틀이 사용되어야 하지만 여기서는 동역학적인 측면은 고려하지 않고 정적 상태로 가정하고 해석하였다. Fig. 4 는 메쉬된 롤러의 형상을 보여준다.

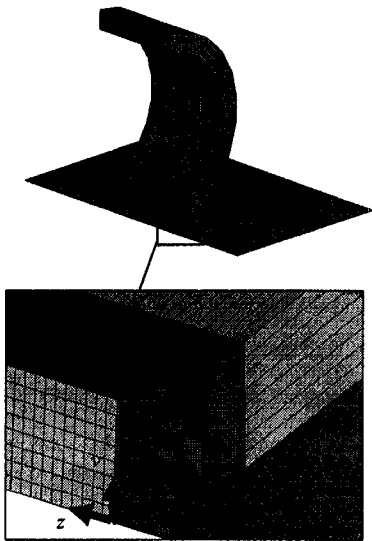


Fig. 4 FEM model of roller

Table 1 Parameter values used in result of Fig. 5

Parameter	Value
Roller inner radius, R_i	40(mm)
Roller outer radius	50(mm)
Roller width	100(mm)
Young's modulus	3.0(MPa)
Poisson ratio, ν	0.30
Friction coefficient between roller and plate, μ	0.0
Load applied, F	50(Kgf)

일반적으로 롤러는 중앙의 강체 축에 고무 재료의 코팅이 입혀져 있으므로 축 위치의 롤러 요소는 상호 연성되어 있고 축에 대한 상대 변형은 없다고 가정할 수 있다. 또한 정적 상태의 가정에 따라 납의 중심에 수직인 평면에 대해 대칭이며 롤러의 양 쪽 지지 축에 동일한 하중이 작용할 경우 폭 방향으로 대칭을 이루게 된다. 따라서 yz 평면, xy 평면에 대해 대칭으로 가정하여 해석할 수 있다. 롤러의 영 계수 및 포아송 비 등의 물성은 변형량에 무관한 상수로 가정하여 선형 구간을 가정하고 해석하였다. 또한, 해석의 수렴 안정성을

위해 마찰 계수는 0 으로 가정하여 무마찰 상태에 대한 해석을 수행하였다.

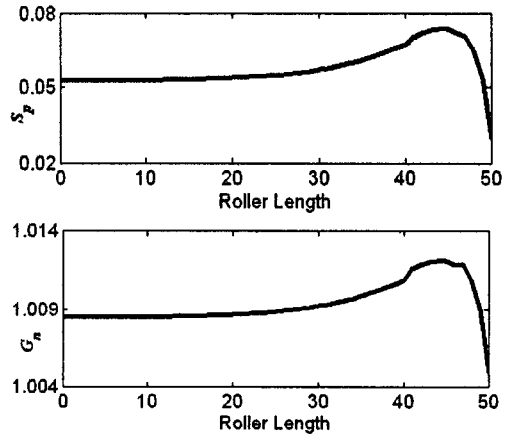


Fig. 5 S_p and G_n with respect to roller length

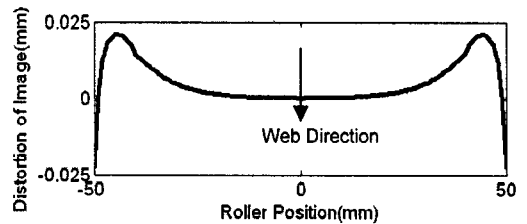


Fig. 6 Distortion of image

Fig. 5 는 Table 1 로 주어지는 롤러의 물성 및 형상, 접촉 조건 대하여 얻어진 납 변형량 S_p 와 변형율 G_n 을 롤러의 폭 방향에 대하여 보여준다. 여기서 보듯, 롤러의 중앙에서는 거의 일정한 납 변형량을 보여주지만, 롤러의 경계로 갈수록 커지다가 경계 부근에서 급격히 감소하였으며 중앙 대비 약 0.02mm 의 왜곡이 나타났다. 한편, 이득의 경우 롤러의 중앙에서 약 0.9%의 증가가 나타났으며 납 변형량과 마찬가지로 경계로 갈수록 증가하다가 경계 부근에서 급격히 감소하였고 최대 약 1.2%의 이득 증가가 나타났다. Fig. 5 의 롤러 납 변형으로부터 발생하는 인쇄 패턴의 왜곡을 Fig. 6 에 나타내었다. 이 때 롤러의 중심에서의 왜곡을 0 으로 봤을 때, ± 0.25 mm 정도의 왜곡이 나타나며 중심에서는 피인쇄체의 이송 방향으로 오목하고, 경계부분에서는 반대로 이송 방향으로 볼록한 형태로 나타남을 알 수 있다.

Fig. 7, 8, 9, 10 은 각각 $\nu = 0.1, 0.3, 0.4, 0.499$ 의

포아송 비에 대해 $F=1, 10, 25, 50, 100$ 의 경우에 대해 S_p 와 G_n 를 구한 그림이다. 여기서 볼 수 있듯이 포아송비가 0.1, 0.3 으로 작을 경우 하중이 커질수록 닢 변형량은 양의 값을 가지며 커지지만, 포아송비가 0.499 로 클 경우 닢 변형량은 음의 값을 가지며 더 작아진다. 포아송비가 0.4 일 경우 과도적인 모습을 보인다. 닢 변형량은 결국 전이 위치의 이동과 패턴의 왜곡을 나타내므로 포아송 비에 따라 패턴의 전이 위치가 기준점보다 앞 뒤로 이동하여 나타날 수 있음을 보여준다. 닢 변형률은 포아송비가 0.1 일 경우 하중이 증가할수록 1 보다 점점 커지며 0.499 일 경우 1 보다 점점 작아지며 포아송비 0.3, 0.4 의 경우 과도적인 모습을 보인다.

Fig. 11 은 동일한 하중에 대해 서로 다른 포아송비를 갖는 경우의 S_p 와 G_n 를 구한 결과로 포아송비가 커질수록 왜곡 현상은 더 심해짐을 알 수 있다.

Fig. 12 는 동일한 포아송비와 동일한 하중에 대해 고무 롤러의 내경, 즉 고무의 두께가 달라질 경우에 대한 결과로, 고무 롤러의 내경이 작아질수록, 즉 고무가 두꺼울수록 왜곡 현상은 심해짐을 알 수 있다.

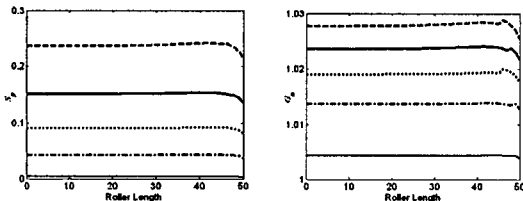


Fig. 7 S_p and G_n plots for different values of loading with $\nu=0.1$, $F=1$: —, $F=10$: ---, $F=25$: ----, $F=50$: ———, $F=100$: - - - -

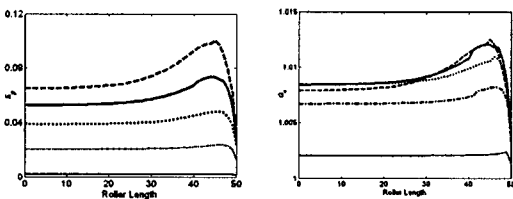


Fig. 8 S_p and G_n plots for different values of loading with $\nu=0.3$, $F=1$: —, $F=10$: ---, $F=25$: ----, $F=50$: ———, $F=100$: - - - -

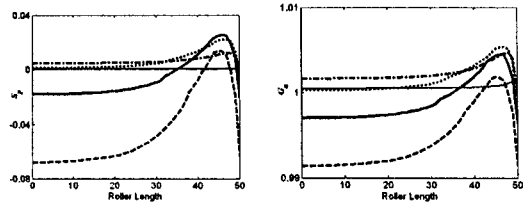


Fig. 9 S_p and G_n plots for different values of loading with $\nu=0.4$, $F=1$: —, $F=10$: ---, $F=25$: ----, $F=50$: ———, $F=100$: - - - -

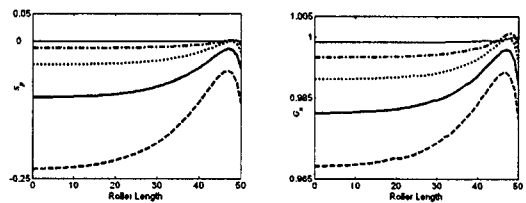


Fig. 10 S_p and G_n plots for different values of loading with $\nu=0.499$, $F=1$: —, $F=10$: ---, $F=25$: ----, $F=50$: ———, $F=100$: - - - -

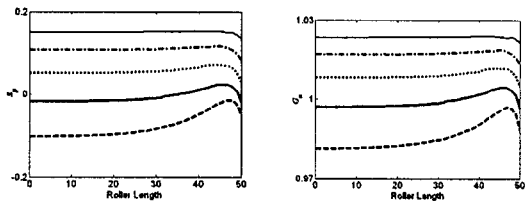


Fig. 11 S_p and G_n plots for different values of Poisson ratio with $F=50$, $\nu=0.1$: —, $\nu=0.2$: ---, $\nu=0.3$: ----, $\nu=0.4$: ———, $\nu=0.499$: - - - -

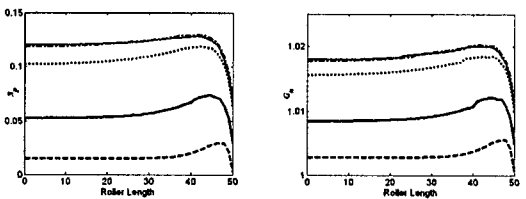


Fig. 12 S_p and G_n plots for different values of R_i with $F=50$ and $\nu=0.3$, $R_i=10$: —, $R_i=20$: ---, $R_i=30$: ----, $R_i=40$: ———, $R_i=45$: - - - -

4. 실험장치를 이용한 인쇄패턴왜곡 검증 예

Fig. 13 은 잉크 인쇄 패턴 왜곡을 실험적으로

검증하기 위한 실험 장치이다. 볼-스크류에 의해 직선으로 이송되는 평판 제판과 블랑켓 롤러, 가압 롤러로 구성되어 있으며 공기압 장치에 의해 각 롤러에 독립적으로 압력을 가할 수 있는 구조로 제작되었다. 제판의 패턴은 웹 진행 방향을 기준으로 할 경우 길이 0.5mm, 폭 120mm 로 롤러의 폭 100mm 보다 크게 하여 인쇄 시 잉크의 유무에 따른 마찰력의 영향을 줄이도록 하였다. 인쇄 속도는 0.025m/s 로 매우 낮은 속도로 인쇄를 수행하여 동역학적인 요소의 영향을 최소화 하도록 하였다.

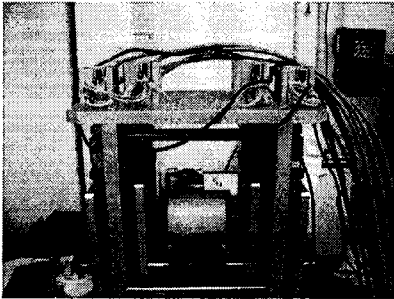


Fig. 13 Test apparatus for gravure offset printing

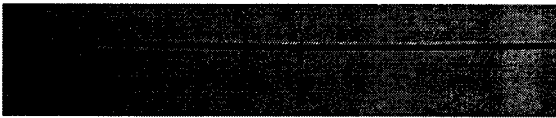


Fig. 14 Image distortion from experiment result

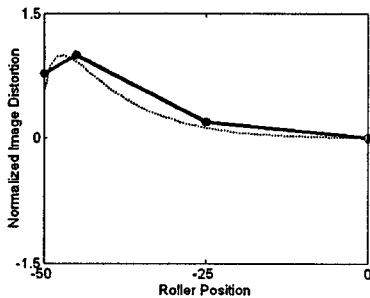


Fig. 15 Image distortion, simulation result ($\nu=0.4, \mu=0.0, R_i=40, F=100$): -----, experiment result: —

Fig. 14 는 0.5mm 의 선폭의 직선 제판으로부터 인쇄 된 결과를 보여주며 Fig. 15 는 인쇄된 결과의 패턴 왜곡을 측정 한 결과와 시뮬레이션 결과를 최대 변형량으로 표준화하여 비교한 그림이다. 시뮬레이션에서는 실제 실험과 같이 $R_i=40, F=100$ 로

주었고 포아송 비는 $\nu=0.4$, 마찰계수 $\mu=0$ 으로 가정하였다. 시뮬레이션 결과와 실험 결과의 정성적 경향이 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

5. 결론

그라비아 옵셋 인쇄에서 발생하는 인쇄 패턴 왜곡 현상에 대한 원인은 고무 롤러의 변형에 따른 nip 변형량인 것을 밝혔으며 롤러의 재질, 고무의 두께, 하중 등에 따라 패턴의 왜곡 정도가 달라짐을 보였다. 특히, 포아송 비의 크기에 따라 패턴의 전이 위치도 크게 달라질 수 있음을 알 수 있다. 그라비아 옵셋 프린팅 실험 장치로부터 실험적으로 얻어진 패턴 왜곡 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하여 시뮬레이션 결과의 타당성을 증명하였다. 패턴의 왜곡은 크게는 수백 마이크로미터 까지 발생하며 이는 전자소자 인쇄 등의 고정밀을 요구하는 인쇄에서는 매우 중요한 요소로 작용할 수 있을 것이다. 따라서 향후 이를 고려한 패턴의 제작이나 왜곡을 줄이기 위한 설계에 대한 연구가 필요하다.

참고문헌

1. Choi, B. O., Ryu, B. S., Kim, C. H., Lee, T. M., Kim, D. S., Youn, S. N., Lee, M. H. and Lim, K. J., "Development of Roll to Roll Printing System for Printing of Printed Electronics," Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineering Autumn Conference, 2005.
2. Kim, C. H., Ryu, B. S., Lim, K. J., Lee, M. H., Lee, T. M., Youn, S. N. and Choi, B. O., "Development of Roll-to-Roll Printing System for Fine Line-width Printing," Proceedings of the Korean Society for Precision Engineering Spring Conference, pp. 583-584, 2006.
3. Choi, B. O., Ryu, B. S., Lim, K. J., Kim, K. Y., Kim, D. S., Youn, S. N., Ham, Y. B., Lee, T. M., Jo, J. D., Lim, H. E., and Yu, C. S., "Method and apparatus for manufacturing electronic device using roll-to-roll rotary pressing process," Korea Patent, No. 0634327, 2006.
4. Soong, T. C. and Li, C., "The steady rolling contact of two elastic layer bonded cylinders with a sheet in

- the nip," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 23, pp. 263-273, 1981.
5. Soong, T.C. and Li, C., "The rolling contact of two elastic-layer-covered cylinders driving a loaded sheet in the nip," *ASME J. Appl. Mech.*, Vol. 48, pp. 889-894, 1981.
 6. Diehl, T., Stack, K. D. and Benson, R. C., "A study of three-dimensional nonlinear nip mechanics," *Proceedings of the 2nd International Conference on Web Handling*, pp. 161-182, 1993.
 7. Stack, K. D., "A nonlinear finite element model of axial variation in nip mechanics with application to conical rollers," Ph.D. Thesis, University of Rochester, 1995.