

# 리버스 오프셋 인쇄에서 PDMS 블랑켓 변형이 인쇄에 미치는 영향에 관한 연구

최영만\*† · 김광영\* · 조정대\* · 이택민\*

\* 한국기계연구원 인쇄전자연구소

## Effect of PDMS Blanket Deformation on Printability in Reverse-Offset Printing

Young-Man Choi\*†, Kwang-Young Kim\*, Jeongdai Jo\* and Taik-Min Lee\*

\* Dept. of Printed Electronics, Korea Institute of Machinery and Materials

(Received May 19, 2014 ; Revised June 17, 2014 ; Accepted June 24, 2014)

**Key Words:** Reverse-Offset Printing(리버스오프셋 인쇄), Finite Element Analysis(유한요소해석), Printability(인쇄성)

**초록:** 리버스 오프셋 인쇄는 인쇄전자를 위한 미세 패터닝기술 중 하나로서 수  $\mu\text{m}$  이하의 선폭을 구현할 수 있다. 오프셋 인쇄의 특성상 잉크는 PDMS 재질의 블랑켓에 전사된 후 음각으로 패터된 클리셰에 접촉하여 불필요한 패턴을 제거하게 되는데, 이 때 블랑켓은 압력에 의하여 음각 패턴 내부로 침투하는 변형이 발생한다. 이러한 변형은 인쇄 압력에 비례하며, 과도한 인쇄 압력은 넓은 면적의 패턴을 인쇄할 때 클리셰 패턴의 바닥에 블랑켓이 닿는 불량을 일으키게 된다. 이 논문에서는 리버스 오프셋 인쇄에서 가압변위에 따른 PDMS 블랑켓의 변형을 유한요소기법을 이용하여 모델링하고 접촉압력 대비 변형량을 예측함으로써 실제 인쇄 장비의 실험 결과와 비교하여 인쇄결함이 발생하지 않도록 하는 클리셰의 제작조건을 제시하고자 한다.

**Abstract:** Reverse-offset printing is one of the technologies that can be used for patterning fine features of the order of a few micrometers for printed electronics. In reverse-offset printing, a coated ink film is transferred to a blanket made of elastomer-like poly-dimethylsiloxane. Then, the blanket is impressed onto a cliché that has intaglio patterns. The blanket is deformed by penetrating the intaglio of the cliché according to the printing pressure. Excessive deformation of the blanket can cause printing defects upon touching the bottom of the intaglio pattern, especially in large patterns. In this paper, we modelled the deformation of the blanket using the finite element method. Considering the actual printing parameters, a condition for fabricating a cliché is proposed to prevent defects by the deformation of the blanket.

- 기호설명 -

### 1. 서론

- $E$  : Young 계수
- $\nu$  : 푸아송 비
- $P$  : 펀치 테스트 시 블랑켓에 가하는 힘 (N)
- $D$  : 펀치 직경 (mm)
- $h$  : 펀치 테스트 시 블랑켓의 변형량 (mm)
- $\Delta z$  : 블랑켓의 침투변형량 ( $\mu\text{m}$ )

인쇄기법을 이용한 미세 패턴 제작기술은 기존의 노광공정에 비해 공정수가 작고 연속적인 생산이 가능하다는 점에서 주목받고 있다. 미세 패턴 제작을 위한 인쇄기법 중 리버스 오프셋 인쇄 기술은 1  $\mu\text{m}$  선폭<sup>(1)</sup>까지 매우 작은 패턴도 인쇄가 가능하며 인쇄된 패턴의 두께가 매우 균일하다는 장점이 있다. 이러한 고정밀 인쇄 성능 덕에 리버스 오프셋은 TFT(thin film transistor)<sup>(1-3)</sup>에 적용되었으며, 최근에는 터치스크린 센서를 메탈

† Corresponding Author, ymchoi@kimm.re.kr  
© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

메시를 이용한 투명 전극을 인쇄<sup>(4)</sup>하여 제작하려는 연구도 이루어지고 있다. 리버스 오프셋인쇄는 일반적으로 PDMS(poly-dimethylsiloxane) 블랑켓을 이용하여 잉크를 기판에 전사시키게 되는데, PDMS의 낮은 강성으로 인하여 변형이 발생하여 인쇄 불량이 발생하는 경우가 있다.<sup>(2)</sup> 이에 따라 기존 연구에서는 유한요소기법을 이용하여 PDMS 블랑켓 변형을 모사하거나 인쇄성과의 관계를 파악하려는 노력이 있었다.<sup>(2,3)</sup>

본 연구에서는 리버스 오프셋 인쇄에서 가압변위에 따른 블랑켓의 변형을 유한요소기법을 이용하여 모델링하고, 이로부터 접촉압력 대비 변형량을 예측함으로써 실제 인쇄 장비의 실험 결과와 비교하여 인쇄결함이 발생하지 않도록 하는 클리셰(cliché)의 제작조건을 제시하고자 한다.

## 2. 리버스 오프셋 인쇄

### 2.1 리버스 오프셋 인쇄 과정

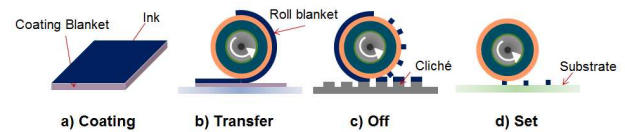
리버스 오프셋 인쇄는 Fig. 1과 같이 크게 Coating - Transfer - Off - Set의 4개의 단계로 진행되는데, 맨 먼저 코팅 블랑켓(coating blanket)이라고 불리는 기판에 잉크를 코팅하면 잉크의 박막이 형성되고(Fig. 1(a)), 이를 PDMS로 만들어진 롤 블랑켓(roll blanket)에 전사한다(Fig. 1(b)). Table 1에 표시한 바와 같이 코팅 블랑켓에 비해 롤 블랑켓은 표면 에너지가 높아 잉크 박막은 100% 전사된다. 전사된 잉크 박막을 가진 블랑켓을 원하는 패턴이 음각으로 새겨져 있는 클리셰 상에 접촉하여 회전시키면 클리셰의 큰 표면에너지에 의하여 불필요한 패턴이 클리셰로 전사되고 PDMS 블랑켓에는 최종적으로 인쇄될 패턴만이 남게 된다(Fig. 1(c)). 이 때, 각 계면에서의 접착(adhesion)에 의하여 잉크의 응집력(cohesion)이 깨어지지 않아야 잉크 박막 내부의 분리 없이 100% 전사되는 것이 가능하다. 마지막으로 남은 패턴을 기판에 전사시키면 인쇄가 완료된다(Fig. 1(d)).

리버스 오프셋 인쇄는 균일하게 코팅된 잉크 박막을 이용하므로 패턴된 후에도 동일한 두께가 유지되며, 높은 해상도를 가지는 클리셰에 의한 인쇄로 초미세 패턴의 형성이 가능하다. 클리셰의 패턴은 보통 습식 에칭 또는 건식 에칭 기법으로 만들어지는데, 건식 에칭 기법은 비등방성 에칭이 가능하고 높은 분해능과 높은 종횡비의 패턴을 만들 수 있는 장점이 있다. 하지만 종횡

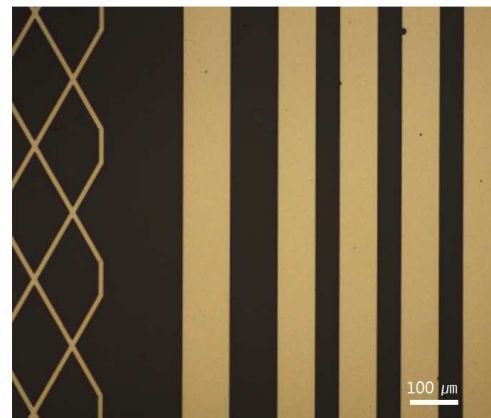
**Table 1** Surface energy of blankets and cliché

	Coating blanket	Roll blanket	Cliche
Surface energy* (mN/m)	15.5	18.6	51.2

\*Measured using Owens-Wendt geometric mean



**Fig. 1** Reverse-offset process



**Fig. 2** Printed patterns using reverse-offset printing

비에 한계가 있고, 모든 선폭에 대하여 같은 깊이로 에칭되므로 적절한 에칭 깊이가 선정되어야 한다.

PDMS는 영계수가 0.2 ~ 3.6 MPa<sup>(5)</sup> 정도로 Transfer 또는 Off 공정시에 가해지는 압력에 의하여 쉽게 변형되며, 고무와 같이 초탄성적인 특징을 지닌다. 특히 Off 시에 클리셰의 음각 패턴(Fig. 1(c))이 깊지 않으면, blanket이 바닥에 닿아 전사되지 않아야 할 부분이 전사되는 인쇄 불량이 발생한다.<sup>(2)</sup> Fig. 2는 리버스 오프셋 인쇄로 제작된 메탈 전극 패턴으로서 10 μm와 100 μm의 패턴이 매우 균일하게 인쇄되어 있다.

### 2.2 리버스 오프셋 인쇄 시 접촉 압력

롤에 감긴 블랑켓을 평평한 클리셰 또는 기판에 압력을 가하여 생성되는 접촉면을 닙(Nip)이라고 하는데 닙의 크기는 압력에 따라 달라지며

**Table 2** Nip size and contact pressure in a reverse-offset printing equipment

Printing force (kgf)	5	10	15	20
Nip size (mm)	2.10	3.05	3.70	4.40
*Contact pressure (MPa)	0.234	0.321	0.396	0.446

\* Peak contact pressure = 1.5×mean contact pressure

넙 내부의 압력의 분포도 위치에 따라 다르다. 실제 리버스 오프셋 인쇄 장비의 인쇄 범위에서 인쇄 힘(Printing force)에 따른 넙의 크기 및 접촉 압력은 Table 2와 같다. 인쇄 힘은 롤에 설치된 로드셀에 의해 측정되며, 넙의 크기는 압지를 이용하여 측정하였다. 롤 블랑켓에 가해지는 인쇄 힘에 대해 넙의 크기는 비선형적으로 비례하나 접촉 압력은 선형적으로 비례하여 증가하였다.

### 3. PDMS 변형 해석

#### 3.1 PDMS 물성

인쇄에 사용되는 PDMS 블랑켓의 영계수 (Young's Modulus)를 구하기 위하여 punch test<sup>(6)</sup>를 수행하였다. 직경 3 mm의 silicon punch를 이용하여 PDMS에 압력을 가하고 이 때의 변위와 힘을 기록하였다. 로딩 속도는 0.1 mm/s 로 하고, 60  $\mu\text{m}$ 까지 변형을 가하였다. Punch test에서 영계수는 아래 식과 같이 구할 수 있다.

$$E = (1 - \nu^2) \frac{P}{hD} \quad (1)$$

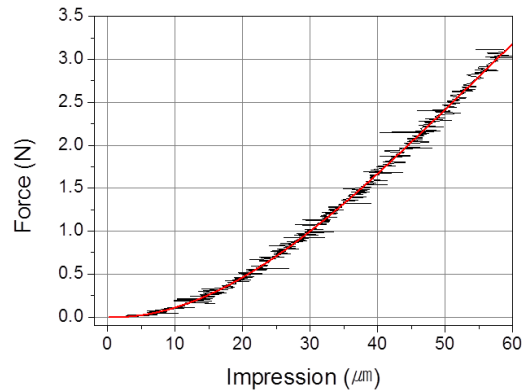
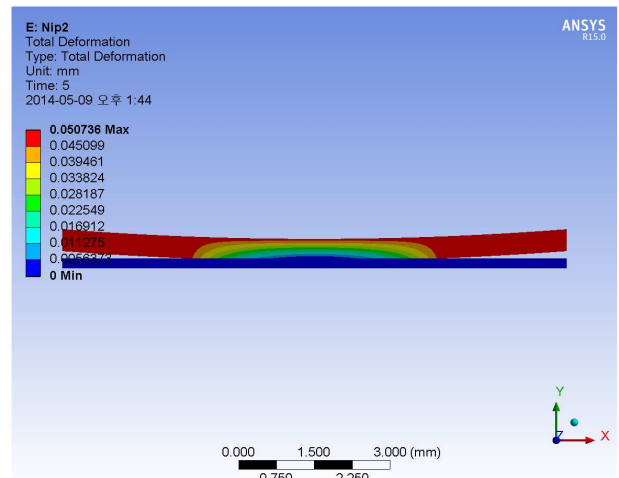
Fig. 3에 도시된 가압변위-힘 그래프를 보면 블랑켓이 압축변형량에 따라 기울기가 달라지는 nonlinear elastic한 특징을 가짐을 알 수 있다. 본 연구에서는 해석의 단순화를 위하여 약 10  $\mu\text{m}$ 에서의 영계수에 해당하는 2.5 MPa의 선형 탄성모델을 적용하였다.

#### 3.2 블랑켓 변형의 유한요소 해석

클리체의 패턴에 의한 블랑켓의 변형을 예측하기 위하여 유한요소 해석을 수행하였다. 롤의 직경은 130.4 mm 이며 블랑켓은 PDMS 재질로서 0.435 mm 두께로 모델링하였다. 해석은 ANSYS Workbench 15를 사용하였으며, plane182 element의

**Table 3** Mechanical properties of PDMS and Si cliché

	PDMS	Si	Unit
Young's Modulus	2.5	169,000	MPa
Poisson ratio	0.499	0.28	

**Fig. 3** Punch test results**Fig. 4** Finite element analysis results of the deformation of the blanket (impression: 50  $\mu\text{m}$ )

enhanced strain method를 이용하여 접촉면에서의 수렴성을 높였다. 접촉 모델은 target169, conta172를 사용하였으며 마찰계수는 0.3으로 하였다. 최소 mesh size는 5  $\mu\text{m}$ 로 총 element수는 56,263개이다. 해석에 사용된 PDMS와 Si 의 기계적 물성을 Table 3에 나열하였다.

#### 3.2.1 넙의 크기 및 접촉 압력

Fig. 4는 50  $\mu\text{m}$ 의 변위를 가하였을 때 롤 블랑켓의 변형된 형상을 보여주는데, 이 때 넙은 블랑켓을

완전압축성으로 생각하였을 때의 닙의 크기와 거의 일치하였다(Fig. 5의 실선 참고). 물의 형상으로 인하여 가압변위와 물에 가해지는 힘 사이는 Fig. 5와 같이 비선형으로 비례하게 되는데, 닙의 크기와 이 힘은 상호보완적인 관계이다. 닙 내부에서 접촉 압력은 2차 곡선 형태로 분산되는데 이 때 최고 접촉압력은 Fig. 6에 도시한 바와 같이 가압변위에 비례하는 것을 알 수 있다. Fig. 7은 Table 1의 실제 인쇄장비에서의 실험결과를 가압변위에 따른 접촉

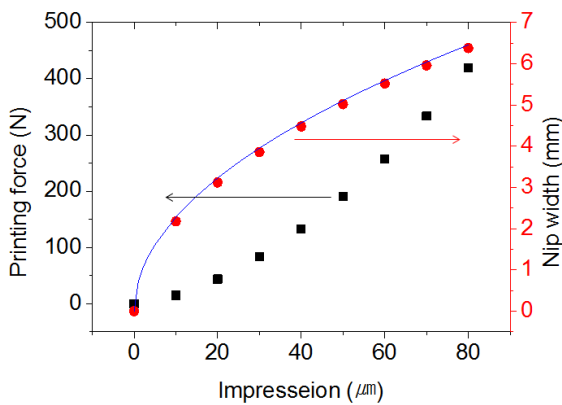


Fig. 5 Printing force and nip width vs. impression (square: printing force, circle: nip width)

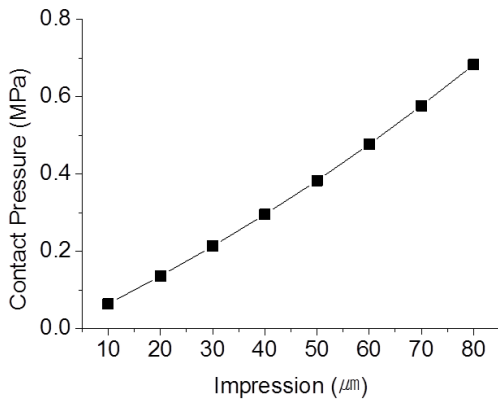


Fig. 6 Contact pressure vs. impression

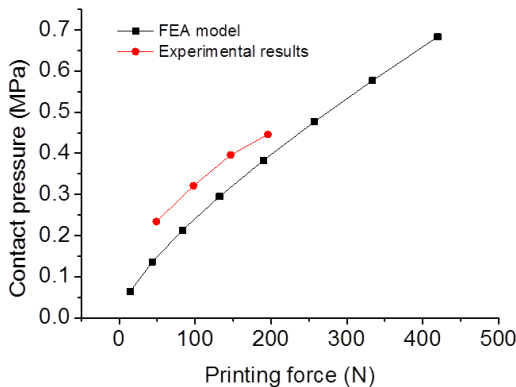


Fig. 7 Contact pressure vs. printing force

압력으로 도시한 것으로서, 유한요소 모델결과와 그 경향이 비슷함을 알 수 있다. 실험결과가 다소 크게 나타난 것은 PDMS 물성의 비선형성에 의하여 모델링에 사용된 강성보다 더 큰 강성을 가지게 되어, 실제에서는 더 작은 닙이 발생하고, 이에 따라 접촉 압력도 상승하는 것으로 생각된다.

3.2.2 클리셰 패턴에 의한 블랑켓의 침투 변형

사각홈 형태의 클리셰 패턴에 블랑켓이 눌러질 때의 변형을 해석하기 위하여, Si 클리셰에 10 μm, 100 μm 두 선폭에 대하여 20 μm의 깊이로 홈을 만들고 해석을 진행하였다. 실제로는 블랑켓

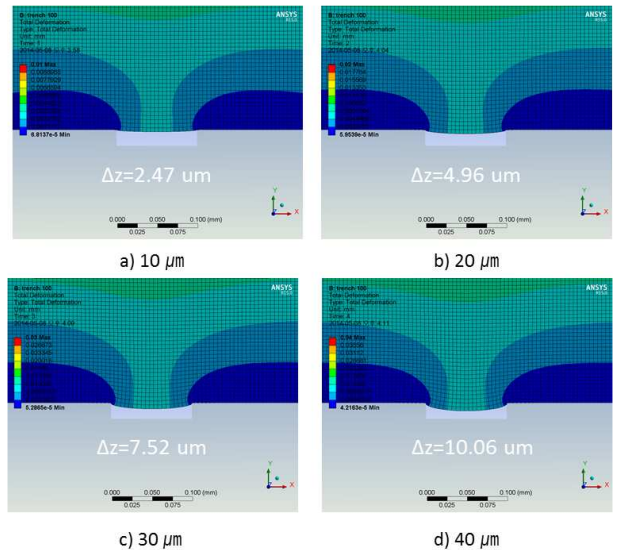


Fig. 8 Penetration depth of the blanket according to the impression (cliché pattern width: 100 μm)

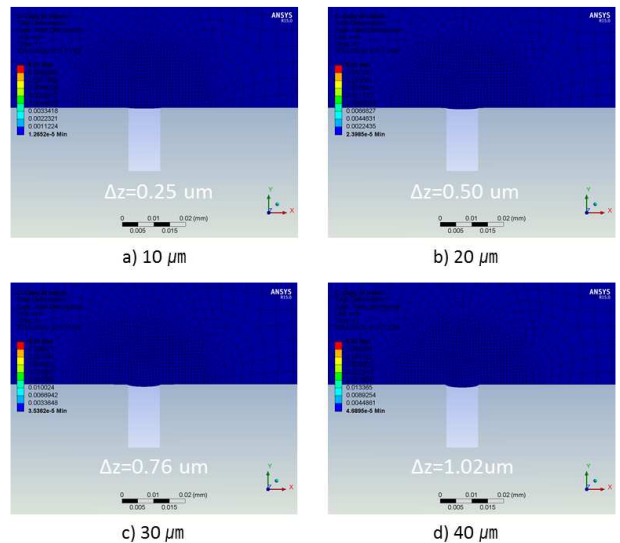


Fig. 9 Penetration depth of the blanket according to the impression (cliché pattern width: 10 μm)

과 클리쉐 사이에 잉크 박막이 존재하나 잉크 박막의 두께가 수  $\mu\text{m}$  이하로 매우 얇고 그 강도 또한 무시할 수 있을 정도로 작아 해석 모델에는 포함하지 않았다. Fig. 8과 Fig. 9는 각각 선폭 100  $\mu\text{m}$ , 선폭 10  $\mu\text{m}$ 에 대한 해석 결과이다. 두 그림에서 보는 바와 같이 홈 내부로 블랑켓이 침투하면서 아래로 볼록한 변형이 발생되며 가압변위에 비례하여 침투 변형량이 커짐을 알 수 있다. 만약 클리쉐의 깊이가 이 침투 변형량보다 작다면, 잉크가 패턴 안쪽 바닥에 접촉하여 불량이 발생되게 된다. 동일한 가압변위에서는 선폭이 작을수록 침투변형량도 작게 된다.

Fig. 10은 각 가압변위에서의 접촉 압력을 구하고 그에 따른 침투 변형량을 10  $\mu\text{m}$ 와 100  $\mu\text{m}$  두 선폭에 대한 비율로 나타낸 것이다. 두 결과에서 차이는 유한요소 모델에서 선폭과 전체 폭의 비차이에 의한 오차로 생각된다. PDMS의 침투변형 크기는 선폭의 크기에는 상관없이 선폭 대비 일정한 비율을 가지게 된다. 이 해석결과로부터 실제 인쇄에서 흔히 사용되는 0.1 ~ 0.3 MPa의 범위에서 선폭 대비 약 4 ~ 12%의 침투 변형이 발생하는 것으로 예측된다.

Fig. 11은 인쇄 시 PDMS 블랑켓과 Si 클리쉐가 받는 응력을 도시한 것인데, 클리쉐 패턴 홈의 가장자리에 응력 집중이 발생하며, 이 부분에서 잉크 박막의 크랙(crack)이 발생하여 박막으로부터 패턴이 분리되는데, 크랙이 발생하기 위해서는 일정값 이상의 접촉압력이 필요하다.

클리쉐의 패턴 깊이는 최소 선폭에 의해 결정되는데, 보통 최소 선폭의 10배정도가 최대의 에칭 종횡비이므로, 최소 선폭의 10배정도의 깊이에서 PDMS의 침투변형이 없어야 인쇄불량이 발생하지 않는다. PDMS의 침투변형만을 고려하였을 때는 접촉압력이 작으면 작을수록 좋지만, 실제 인쇄에서는 어느 크기 이상의 응력 집중이 발생하여야만 패턴이 성형되므로 침투변형의 크기는 최대 선폭의 깊이 이내로 발생되어야 한다. 이는 다음의 조건식 (2)으로 표현된다.

$$(최대선폭) < \frac{(최소선폭) \times (에칭종횡비)}{0.4 \times (\text{접촉압력})} \quad (2)$$

예를 들어, 0.3 MPa의 접촉압력으로 인쇄를 해야할 경우, 침투변형에 의한 인쇄불량이 발생하지 않으려면, 클리쉐 제작 시에 최대 선폭 또는 피처의 크기는 최소 선폭의 약 80배(에칭 종횡비

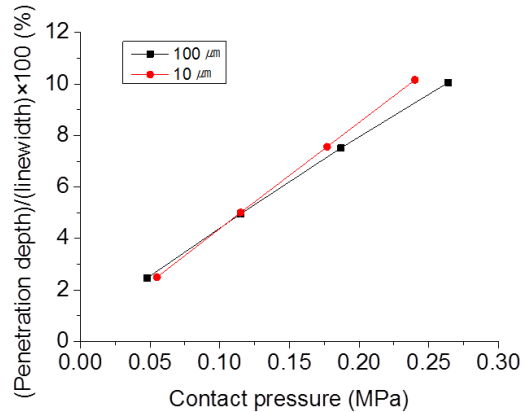


Fig. 10 Deformation ratio vs. contact pressure

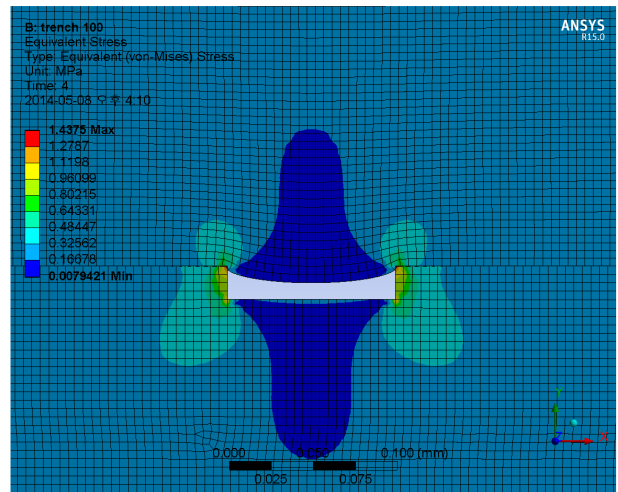


Fig. 11 Finite element analysis of the equivalent stress (impression: 50  $\mu\text{m}$ )

10인 경우)를 넘지 않는 것이 좋다.

#### 4. 결론

리버스 읍셋 인쇄에서는 블랑켓의 변형을 적절히 제어함으로써 미세 패턴을 인쇄할 수 있다. 본 논문에서는 블랑켓의 변형을 유한요소해석기법을 통하여 모델링하고 접촉압력에 따른 변형량을 계산하였다. 이로부터 비등방성 에칭으로 제작된 클리쉐에서 블랑켓 변형으로 인한 인쇄불량이 발생하지 않도록 하는 최대 선폭의 크기에 대한 조건을 제시하였다.

#### 후기

본 연구는 산업기술연구회 및 미래창조과학부의 지원과 한국산업기술진흥원의 “감성터치플랫폼개발 및 신산업화지원사업”의 지원을 받아 수행된 연구

결과임.(과제번호 NK179D, SC0990, MO4650)

참고문헌  
(References)

- (1) Kusaka, Y., Sugihara, K., Koutake, M. and Ushijima, H., 2014, "Overlay of Semi-Dried Functional Layers in Offset Printing for Rapid and High-Precision Fabrication of Flexible TFTs," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 24, p. 035020.
- (2) Chang, Y.-G., Nam, S.-H., Kim, N.-K., Kim, Y.-H., Yoo, S.-S., Kim, C.-D., Kang, I.-B. and Chung, I.-J., 2009, "A Study of Roll-Printing Technology for TFT-LCD Fabrication," *Journal of the Society for Information Display*, Vol. 17, No. 4, pp. 301~307.
- (3) Choi, N., Wee, H., Nam, S., Lavelle, J. and Hatalis, M., 2012, "A Modified Offset Roll Printing for Thin Film Transistor Applications," *Microelectronic Engineering*, Vol. 91, pp. 93~97.
- (4) Choi, Y.-M., Lee, E.-S., Kim, K.-Y., Ko, S., Im, M.-J. and Kim, C., 2014, "Printed Metal Mesh Electrodes for Single-Layer Touch Screen Sensor," *KSPE Spring Meeting 2014*.
- (5) Carrillo, F., Gupta, S., Balooch, M., Marshall, S. J., Marshall, G. W., Pruitt, L. and Puttlitz, C. M., 2005, "Nanoindentation of Polydimethylsiloxane Elastomers: Effect of Crosslinking, Work of Adhesion, and Fluid Environment on Elastic Modulus," *Journal of Materials Research*, Vol. 20, No. 10, pp. 2820~2830.
- (6) Lin, I.-K., Ou, K.-S., Liao, Y.-M., Liu, Y., Chen, K.-S. and Zhang, X., 2009, "Viscoelastic Characterization and Modeling of Polymer Transducers for Biological Applications," *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 18, No. 5, pp. 1087~1099.