



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 박 사 학 위 논 문

오프셋 인쇄기반 PFD 인쇄전자부품
제조에서 롤러틈새의 페이스트내
공동의 변화에 관한 연구



2020년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

인 쇄 공 학 과

김 윤 택

공 학 박 사 학 위 논 문

오프셋 인쇄기반 PFD 인쇄전자부품
제조에서 롤러틈새의 페이스트내
공동의 변화에 관한 연구

지도교수 오 필 건

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함.

2020년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

인 쇄 공 학 과

김 윤 택

김윤택의 공학박사 학위논문을 인준함.

2020년 2월 21일



위원장 공학박사 구철희 (인)

위원 공학박사 윤종태 (인)

위원 공학박사 최송아 (인)

위원 공학박사 정지은 (인)

위원 공학박사 오필건 (인)

목 차

목차	i
List of figures	iii
List of tables	v
Abstract	vi
1. 서 론	1
2. 이 론	4
2-1. 잉크의 전이이론	4
2-1-1. 공동설	4
2-1-2. 점탄성설	6
2-2. 잉크 전이 방정식	6
2-2-1. Tollenaar의 인쇄적성 계수	6
2-2-2. Walket-Fetsco 전이 방정식	11
2-2-3. 잉크 전이 곡선	14
2-3. 피인쇄체의 물성	16
2-3-1. 다공성 피인쇄체의 지료 조성	16
2-3-2. 피인쇄체의 물리적 성질	17
2-3-3. 피인쇄체의 광학적 성질	18
2-3-4. 기공의 직경	20
2-3-5. 기공의 개수	20
2-4. 유한요소법	22
2-4-1. 전산유체역학	22

2-4-2. 수학적 모델링	24
2-4-3. 시뮬레이션의 구성	26
3. 실험	30
3-1. 실험재료	30
3-2. 실험장치	33
3-2-1. 오프셋 인쇄적성시험기	33
3-2-2. 농도계	34
3-3. 시뮬레이션	35
3-4. 실험방법	41
4. 결과 및 고찰	43
4-1. 공동의 성장과 분열	43
4-2. 압력과 점도의 영향	48
4-3. 피인쇄체의 기공도에 따른 유체전이 영향	52
4-4. 피인쇄체의 표면특성이 인쇄적성에 미치는 영향	55
4-5. 시뮬레이션에 의한 전이율 계산	58
5. 결론	60
참고문헌	63

List of figures

Fig. 1. Pressure distribution and velocity profile in the nip.	5
Fig. 2. Conceptual diagram of ink transfer.	12
Fig. 3. A schematic diagram between plate and impression cylinder.	24
Fig. 4. The procedure of simulation by POLYFLOW.	29
Fig. 5. Photography of the printability tester, IGT-C1 model.	33
Fig. 6. Photography of the densitometer, X-rite densieye model.	35
Fig. 7. A part of IGT printability tester and the simulation model of the roll to plate system.	37
Fig. 8. Geometry of the R2P system and the boundary surfaces(BS) with surface for simulation.	37
Fig. 9. Simulated mesh file of the ink in the offset printability tester at initial state.	44
Fig. 10. The width of nip of a IGT offset printability system.	44
Fig. 11. Simulated mesh file of the fluid in the offset printing at steady state.	45
Fig. 12. The comparison of the simulated results about transition of pores.	47
Fig. 13. Experimental results of optical density of PDMS in the offset printing system at steady state.	49
Fig. 14. Amount of transferred PDMS(Q) in the offset printing system at steady state.	49
Fig. 15. Volumetric increasing of PDMS according to the formation of bubbles by agitation.	51
Fig. 16. Print density according to different printing speed.	53
Fig. 17. Print density according to different pressure.	56

Fig. 18. Correlation of Dennison wax value and picking resistance value according to different printing speed.56

Fig. 19. Correlation of Dennison wax value and picking resistance value according to different viscosity.56

Fig. 20. Correlation of Dennison wax value and picking resistance value according to different pressure.58



List of tables

Table 1. Physical Properties of PDMS Samples	30
Table 2. The Properties of Papers	32
Table 3. Experiment Conditions of Offset Lithographic Printing	34
Table 4. Flow Model of the PDMS and the Condition of Simulation	40
Table 5. Condition of the Printing Experiment using by IGT	42



A study on the pore changes in paste at the nip of printing roller for manufacturing of the offset printing based PFD printed electronics

Yun-Taek Kim

Dept. of Graphic Arts Engineering, Graduate school,
Pukyong National University

Abstract

The pore change in the printing nips of offset lithography which is one of the promised method were studied for manufacturing the PFD type printed electronics, the offset lithography printing method is a roll to plate (R2P), roll to roll (R2R) system that is printed by contacting the surface of roll and plate.

The use of printed electronics products as well as roll coatings and polymer processing processes is increasing gradually, so research on fluid automatic control of the same thickness as the analysis of detailed fluid flow is important.

Mathematical interpretation of the behavior of fluids passing through the niche (nip) of the roll to plate system is an essential part of understanding the flow of the fluid, and It is difficult to interpret the behavior of the fluid at once because the transfer of the fluid in an environment where the width of the nip is very narrow and the linear velocity is fast. Therefore, in the nip of the rotating two rolls the transfer rate and the splitting points of paste depend on the behavior of pores, physical properties including the porosity and the surface tension of the papers were experimented and obtained with different types of printed materials. Also correlation factor analysis between experimental and simulated results were performed. IGT printability tester and PDMS based polymers as a paste samples

were used for this printing experiments, and obtained the data of splitting points, transfer rate, print through and printing density of paste samples. and Polyflow package software was used for the computer simulation of pore changes based on Navier–Stokes equation.

As a result, simulation results show that the width of the nip is small for PDMS with higher viscosity under steady state, the pore position moves to the center and the transition rate increases. This is because there are occurred more pore at higher altitudes. And simulation results showed that increased printing pressure reduces covering resistance and increases coverage area ratio to increase metastasis. The increase in the coverage area ratio was found to be consistent with the results of the simulation calculation with a density value ± 0.003 and transfer quantity range ± 0.005 . The results of measurement of the print density, the amount of transition and the value of the show trough as well as the effect of covering resistance were performed, so that the simulations might correct by modifying them. The larger the air porosity, the more likely it is to be affected by the print pressure. It was because the point at which the pore is divided by the higher print pressure moves to the center and increases the transition rate. And the faster the printing speed, the lower the print density regardless of the air porosity, This is thought to have been lacking in time to be affected by air porosity, as the transfer time of fluids at fast printing speeds was short. The higher the surface strength of the printed material, the more resistant the printing speed and the printing trouble of the PDMS sample, but at the printing speeds above 0.8 m/s, the results of same printing trouble resistance were found regardless of the surface strength. This results in a low correlation between the surface strength of the printing material and the resistance of the printing trouble.

Results of this study, the higher the viscosity, the printing pressure of the fluid and the air porosity of the printed material, the higher the transfer rate and the quality of the printed material. however, both the collection range (10~500 poise) of the PDMS samples showed a slight decrease in quality at a print pressure of 700 N or higher, confirming a small change in the metastasis of the fluid in sections above the print pressure of 700 N.

Under steady state conditions, the number of pore that exit of nip was simulated to 5, but we will continue to study the change in number of pore and creation process. These findings are thought to be useful for research in the field of printed electronics using offset systems demanding more precise and uniform products as an interpretation of fluid flow in R2P systems.

1. 서론

오프셋 인쇄 방식은 롤 투 플레이트 (roll to plate, R2P), 롤 투 롤(roll to roll, R2R) 시스템으로 롤과 평판의 표면을 접촉하여 인쇄되는 시스템이다. 롤 코팅, 폴리머 가공공정 등뿐만 아니라 인쇄전자(printed electronics) 제품 제조 공정에서도 사용량이 점차 증가하고 있어 세밀한 유체흐름의 해석과 동일한 두께의 유체 자동제어에 대한 연구가 중요시 되고 있다. R2P 구조는 롤에 코팅액 및 기능성 잉크 등의 점탄성 유체를 공급하고 점탄성 유체는 롤의 표면에서부터 동일한 두께로 점착하여 플레이트로 전이되는 전형적인 원압식 유체 전이 시스템이다. 이와 같은 R2P 시스템에서 nip(롤의 틈새)을 지나가는 유체의 거동에 대한 수학적 해석은 유체의 전이를 이해하기 위해 필수적으로 필요한 부분으로 많은 연구가 존재한다.^{1~4)} 특히, R2P 시스템은 nip의 입구부터 cavitation, laminar, bank, filament의 4단계로 구분해 연구해 왔고, 그 이유로는 nip의 폭이 매우 협소하고 선속도가 빠른 환경에서 유체의 전이현상이 진행되기 때문에 거동을 단번에 해석하기 어려워 구분하여 연구되고 있다. 유체가 nip의 출구에서 늘어나서 분열하기 전까지 과정에 관한 연구는 고분자가공, 금형제작 공정과 유사하여 많은 연구가 진행되어왔다.^{5~6)} 그러나

nip 출구 부분에서 생성되는 유체의 분열에 관한 거동은 이론적, 실험적으로 아직까지 많은 연구가 이루어지지 못하고 있다.

한편 nip의 출구에서 유체가 분열하는데 요구되는 힘을 택 (tack) 또는 부압력 등으로 부르며, 이 택을 측정하는 기계는 개발되어 사용되고 있다.⁷⁾ 유체가 롤의 nip 출구 부분을 통과하여 공동에 의해 필라멘트로 변형된 후, 늘어나서 찢어지는 부분을 분리점이라고 하며 인쇄 시, 이 분리점이 전이율을 선택하게 되므로, 분리점을 계산하는 것이 중요한 과제이다. 그러나 실험적으로 롤러와 플레이트의 nip에서 유체의 분열은 순간적으로 일어나는 현상으로 관찰하기에 많은 어려움이 있다. 고속 인쇄의 경우 오렌지 필(orange peel)이나 날림(misting) 등의 인쇄 트러블을 유발할 수 있으며 nip 출구에서 생성되는 잉크 필라멘트의 분리점의 위치와 잉크 필름의 두께는 뜯김이나 린팅(linting)의 문제와 연관성이 있으며 최종 인쇄물의 농도와 평활성에 큰 영향을 주게 된다. 따라서 이와 관계된 문제의 원인을 찾고자 Lawrence and Gary⁸⁾ 는 점도, 택, 잉크의 비중 등 잉크의 물성에 따른 유체의 전이 현상을 연구 했으며^{9~10)} Deborah는 롤러의 크기나 재질 등의 기구학적인 측면에 대한 연구를 하였다.¹¹⁾ 특히 롤에서 판으로의 전이는 기본적으로 레오로지 뿐만 아니라, 다양한 환경과 변수에 영향을 받기 때문에 모든 조건을 고

려한 실험은 불가능하다. 또한 기능성 잉크를 사용할 때 잉크가 불투명하여 기포 형성 및 성장, 분열을 측정하기가 어렵다. 한편 인쇄전자부품을 제조하기 위한 PFD(paper fluidic devices)들이 3차원 칩투 인쇄를 위해 연구되어왔다.¹²⁾ 오프셋 인쇄방식은 페이스트나 잉크를 압력으로 다공성 용지에 인쇄하기에 적당하다. 그 이유는 인쇄압력을 부여해 줄 수 있기 때문이다.

따라서 본 연구는 PFD 형태의 인쇄전자부품 제조를 위한 오프셋 인쇄방식에서 다공성 피인쇄체의 성질과 공동의 성장 사이에 관계를 연구하고자 하였다. 즉, 기본적인 유체의 전이 메커니즘^{13~14)}을 수학적, 과학적으로 계산하기 위한 기본으로 nip 출구에서 인쇄 압력과 유체의 점도에 따라 전이특성의 변화를 규명하고자 하였다. 특히, 본 논문에서 중심을 둔 것은 실험으로 해석이 어려운 nip의 출구에서 유체의 거동을 Navier-Stokes equation에 의해 계산하고, 유변학적 점탄성 이론으로 시뮬레이션을 진행하여 도출된 결과와 실험한 결과들을 비교하였다.

2. 이 론

2-1. 잉크의 전이 이론

2-1-1. 공동설(空洞說)

롤러와 롤러 사이 또는 두 개의 평행한 판 사이에 있는 잉크가 각각 반대 방향으로 끌어당기는 힘에 의해 스트레스(stress)를 받는데, 이 스트레스가 커지면 잉크의 피막 내에 공동(cavitation, pore)이 생기고, 이 공동이 성장하여 분열된다는 이론이 공동설¹⁵⁾이다. Fig. 1은 동일한 속도로 회전하는 롤러의 nip 안에서 잉크의 압력과 속도의 분포도이다. 롤러가 회전하기 시작하면서 nip 입구에서 급격히 압력이 증가하다가 최대점 A를 지나고 나면 nip의 중심에서 급격히 감소한다. 압력이 대기압과 같게 되는 B점에 이르면 유체는 층류로 유동하며, 정압력이 걸리다가 이 점을 지나면 부압력이 작용한다. 그리고 nip의 출구를 통과한 잉크를 두 롤러가 상하로 끌어당기게 된다. 따라서 압력이 최소로 걸리는 곳에서 유체의 피막이 스트레스를 받으면, 저속에서는 접촉 중심을 향하여 아치상의 자유 계면이 생긴다. 그러나 고속에서는 스트레스를 완화하기 위하여 자유 계면이 이동할 충분한 시간이

없으므로, 피막의 내부에 작은 공동이 발생하고 이것이 급격히 성장하여 필라멘트상으로 늘어난 다음에 끊어지는 현상이 나타난다. 이러한 공동의 생성, 성장, 분열의 단계로 택을 설명하는 이론을 공동설이라고 한다.

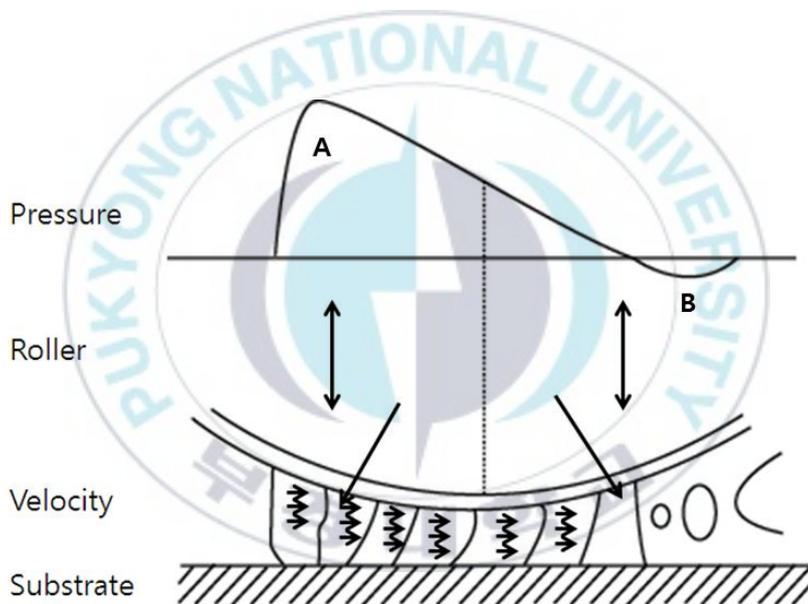


Fig. 1. Pressure distribution and velocity profile in the nip.¹⁶⁾

2-1-2. 점탄성설(粘彈性說)

잉크는 단 시간 내에 일어나는 변형에 의해 점탄성적인 성질을 나타내는데 매순간마다 스트레스를 받는 시간에 따라서 점성액체, 또는 탄성적 고체로 거동하고, 대부분 점탄성인 물질처럼 변형한다는 이론이다. 이 이론은 빠른 속도에서는 스프링이 작용하고, 느린 속도에서는 대시포트(dashpot)가 작용하는 원리와 같은 것이다. 이와 같이 잉크를 점탄성적인 액체로 취급하여 다루는 것이 점탄성설이다.

2-2. 잉크 전이 방정식

2-2-1. Tollenaar의 인쇄적성 계수

Tollenaar의 인쇄적성 계수는 주로 광학적 방법인 농도계에 의해 예측하는 방법으로 정수 m 값은 농도계로 측정하여 측정된 결과 값을 이용하여 구할 수 있다.

다음은 Tollenaar의 전이 방정식에서 농도법의 적용을 수식화한 것으로 이 수식은 Kubelka-Munk의 방정식에서 기인한다. 잉크층의 반사율 R 에 대한 Kubelka-Munk의 방정식은 식 (1)과

같이 나타낼 수 있으며, 여기서 R_∞ 는 가장 두꺼운 잉크량 y 의 반사율, R_g 는 피인쇄체의 반사율, S 는 산란계수이다.

$$R = R_\infty + (R_g - R_\infty) \exp\left(\frac{-S y}{R_\infty}\right) \dots\dots\dots (1)$$

만약 y 가 μm 로 표시되면 S 는 μm^{-1} 로 표시된다. 충분히 반사된다는 가정 하에 일정한 y 의 면적은 도수분포 $\Phi(y)$ 로 가정할 수 있으며, y 와 $y+dy$ 사이의 잉크층 두께는 식 (2)와 같다.

$$dR = \left[R_\infty + (R_g - R_\infty) \exp\left(\frac{-S y}{R_\infty}\right) \right] \Phi(y) dy \dots\dots\dots (2)$$

여기서 반사율 값의 의미는

$$\bar{R} = R_\infty + (R_g - R_\infty) \int_0^\infty \Phi(y) \exp\left(\frac{-S y}{R_\infty}\right) dy \dots\dots\dots (3)$$

식 (3)으로서 $\int_0^\infty \Phi(y) dy = 1$ 이 된다.

광학 농도를 구하는 식은 식 (4)와 식 (5)로서 식 (1)에 대입하

여 농도 값을 구하면 식 (6)이 된다.

$$\bar{D} = \frac{\log R_g}{R} \dots\dots\dots (4)$$

$$D_\infty = \frac{\log R_g}{R_\infty} \dots\dots\dots (5)$$

$$\bar{D} = \log R_g - \log(R_\infty + (R_g - R_\infty) \int_0^\infty \Phi(y) \exp\left(\frac{-S_y}{R_\infty}\right) dy \dots (6)$$

이것을 실험에서 주어진 값에 대입하면 구할 수 있다. $\Phi(y)$ 를 직접 측정하기는 어렵지만 실험의 논리적인 가정을 통해 증명 가능하다. $y=0$ 과 $y=\infty$ 에서 $\Phi(y)=0$ 이라는 것을 알고 있으며 $\Phi(y)$ 는 $0 < y < \infty$ 에서 양(+)의 값을 가질 것이다. 따라서 함수 $\Phi(y)$ 는 y 가 0과 ∞ 사이에서 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi(y) = Cy^n \exp(-ay) \dots\dots\dots (7)$$

만약 n 값이 높으면 일반적(normal)인 함수곡선에 도달하며 n 과 a 모두 높은 값을 가진다면 잉크층 두께는 일정한 경우에 해당하는 함수를 가진다.

한편, C 값은 일반적인 함수로 사용되며 식 (7)을 함수로 표현한다면 식 (8)과 같이 나타낼 수 있고, 이를 통하여 식 (9)와 같이 \bar{y} 를 찾는 것이 가능하다.

$$\Phi(y) = \frac{a^{n+1}}{\Gamma(n+1)} y^n \exp(-ay) \dots\dots\dots (8)$$

$$\bar{y} = \frac{n+1}{a} \dots\dots\dots (9)$$

식 (6)에서 R 을 농도 D 에 반영하면 식 (10)을 구할 수 있다.

$$\bar{D} \approx (n+1) \log\left(\frac{1+S}{aR_\infty}\right) \dots\dots\dots (10)$$

여기서 $R_y \gg R_\infty$ 그리고 n 과 a 가 둘 다 낮은 값을 가질 때 식 (11)과 같이 나타낼 수 있으며 식 (11)에서 $n\left(\frac{1-S}{aR_\infty}\right)$ 항을 \log 로

계산하면 식 (12)와 같이 얻을 수 있다.

$$\frac{(D_{\infty} - \bar{D})}{aR_{\infty}} \approx 1 - \frac{[(n+1)\ln(\frac{1+S}{aR_{\infty}})]}{\ln(\frac{R_g}{R_{\infty}})} \dots\dots\dots (11)$$

$$\frac{(D_{\infty} - \bar{D})}{D_{\infty}} \approx \frac{1 - m\bar{y} + m^2\bar{y}^2}{2(\ln \frac{R_g}{R_{\infty}})/(n+1)} \dots\dots\dots (12)$$

위에서 설명한 바와 같이 농도 곡선에 의해 구할 수 있는 Tollenaar의 전이 방정식은 식 (13)과 같다.

$$D = D_{\infty} (1 - e^{-my}) \dots\dots\dots (13)$$

여기서 D 는 민짜인쇄의 농도, D_{∞} 는 잉크층의 두께가 매우 두꺼운 곳의 농도, m 은 상수로서 종이의 평활도를 나타내며 y 는 종이로 전이되는 잉크의 양이다.¹⁷⁾

2-2-2. Walker-Fetsko 전이 방정식

인쇄적성을 과학적이고 공학적으로 연구하기 시작한 것은 1950년대부터이며 가장 먼저 해석하려고 했던 것은 잉크와 종이의 전이적성이다.

이 문제를 수학적으로 해석하기 위한 첫 단계는 인쇄판의 잉크 전이량에 따른 인쇄물의 잉크량을 정량적으로 측정하는 것이다. 가장 먼저 제안된 Walker-Fetsko 전이 방정식¹⁸⁾은 용지의 피복면적비 (k 값), 고정잉크 개념 (b 값), 그리고 자유잉크의 분열 (f 값)과 같은 세 가지의 개념으로 인쇄 적성계수들을 정의하였다.

Walker-Fetsko의 전이 방정식에서 사용된 세 개의 정수인 k , b , f 를 잉크의 전이정수라고 하며, 가장 중요하게 생각되는 것은 f 값이다. 피인쇄체의 물성에 따라 결정되기 쉬운 k , b 값과는 달리 f 값은 롤러 nip 사이에서의 자유잉크의 피막이 분열하여 종이에 전이되는 비율을 나타내므로, 실제 롤러와 롤러 또는 롤러와 피인쇄체 사이의 잉크들 중에서 어느 부분에서 분열이 되는지를 나타낸다.

Fig. 2는 민짜인쇄에서 잉크의 전이메커니즘을 고려한 것으로써, 피인쇄체와 관련되는 k , b 의 전이정수의 연관성을 배제하고 자유 잉크량만을 고려하였다. 이와 같이 전이정수는 인쇄재료와

인쇄공정상 조건들에 따른 인쇄잉크의 전이를 나타내는 변수이므로, 인쇄공정의 상태를 표현하는 중요한 변수로 사용된다.

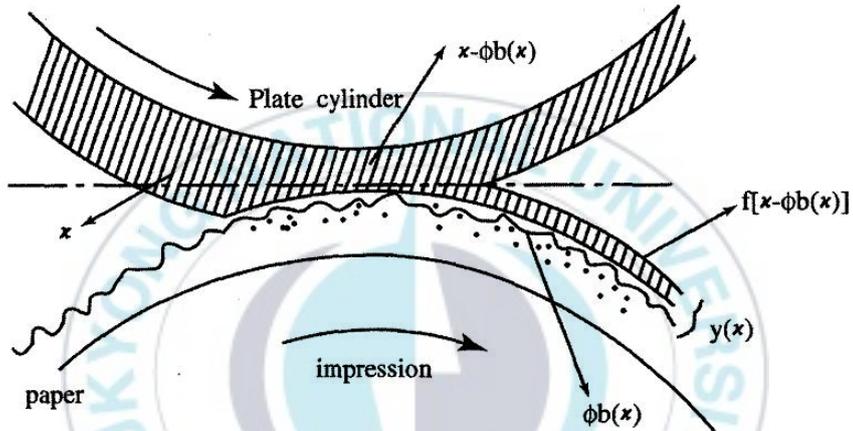


Fig. 2. Conceptual diagram of ink transfer.¹⁹⁾

잉크량을 증가시키면서 종이에 전이된 잉크량에 따른 곡선을 얻을 수 있다. 여기서 잉크량이 많을 때 즉, 포화점 이후부터는 1차함수로 표현할 수 있으며, 식 (14)와 같다.

$$y = b + f(x - b) \quad \dots\dots\dots (14)$$

여기서 y 는 종이에 전이된 잉크량, b 는 고정화 잉크량, f 는 자유잉크의 분열비, x 는 인쇄판상의 잉크량(공급량)이다. 식 (14)를 다시 쓰면 식 (15)와 같으며,

$$y = fx + b(1 - f) \quad \dots\dots\dots (15)$$

식 (14)를 전이율로 표현하면 식 (16)과 같다.

$$\frac{y}{x} = \frac{b}{x} + \frac{f(x-b)}{x} \quad \dots\dots\dots (16)$$

그러나 잉크량이 작을 때는 잉크의 용지가 불완전한 접촉으로 용지의 요철을 효과적으로 채울 수 없게 된다. 따라서 접촉면적비와 실제 접촉된 영역에서 전이된 잉크량의 개념을 도입하면 잉크에 의해 접촉된 종이의 면적은 식 (17)과 같이 표현할 수 있다.

$$F = 1 - e^{-kx} \quad \dots\dots\dots (17)$$

또한 실제 접촉된 영역에서 전이된 잉크의 양을 고려하면 식

(18)과 같다.

$$\phi b = b(1 - e^{-\frac{x}{b}}) \dots\dots\dots (18)$$

이 개념으로 식 (15)를 다시 정리하면 식 (19)와 같이 된다.

$$y = (1 - e^{-kx})[b(1 - e^{-\frac{x}{b}}) + f[x - b(1 - e^{-\frac{x}{b}})]] \dots\dots\dots (19)$$

식 (19)가 Walker 와 Fetsko의 전이 방정식이다. 따라서 식 (14)와 식 (16)에서 전이계수 b, f, k를 얻을 수 있다.

이 식은 종지와 잉크의 관계를 나타낸 것으로 종지와 잉크의 고유한 관계를 얻을 수 있다. k값은 적은 양의 잉크범위에서 얻은 값이므로 포화점 이상의 잉크필름 영역에서는 사용할 수 없다.²⁰⁾

2-2-3. 잉크 전이 곡선

인쇄적성을 연구하기 위한 초기의 과정은 피인쇄체와 잉크에서의 상호작용에 대한 연구로부터 시작되었으며 이 중에서도 초기에 많이 사용되던 solid 인쇄에 관한 연구였다.

solid 인쇄의 메커니즘은 인쇄 시 잉크가 피인쇄체로 전이되는 과정을 과학적으로 나타낸 것이다. 이 문제들을 수학적으로 해결하기 위한 첫 번째 단계는 인쇄판에 공급된 잉크량이 얼마인지에 따라서 달라진다는 개념 아래 인쇄판 상의 잉크량에 따른 인쇄물에 도피되는 잉크량을 측정하는 방법이었다. 이것을 나타낸 것을 전이 곡선(transfer curve)이라고 하며, 전이율을 나타낸 결과를 전이율 곡선(fractional transfer curve)이라고 한다.

최대 잉크 전이량(Y_{max})은 잉크 전이량 곡선과 잉크 전이율 곡선에 의해서 얻을 수 있다. 잉크 전이량 곡선의 판의 잉크량(X)에 대해서 피인쇄체에 전이된 잉크량(Y)의 관계로 표시되고, 잉크 전이율 곡선은 피인쇄체에 전이된 잉크의 전이율(Y/X)의 관계로 나타내며, 이 전이량 곡선은 대부분 S-곡선의 형태를 이룬다.

만약, 기름을 완전히 받아들이는 피인쇄체에 인쇄하고, 인쇄속도가 1 m/s 이하처럼 충분히 느리다고 가정하면 잉크의 전이량 곡선은 50%로 일정한 선을 유지할 것이다. 즉, 잉크층의 두께보다 더 깊은 피인쇄체의 요철과 기공 등이 직선과 곡선의 편차를 만드는 것이다.

인쇄판에 잉크량이 많아지면 인쇄압에 의해서 점차 깊은 기공의 끝까지 잉크가 묻게 될 것이므로 잉크의 전이율은 50%보다

적어지게 된다. 즉, 이 전이량과 전이율의 곡선은 잉크층과 기공이나 요철이 있는 피인쇄체의 불완전한 접촉에 의해서 생기는 것이다. 따라서 피인쇄체의 특성 및 잉크와의 접촉 특성 등에 밀접한 관계가 있다.

2-3. 피인쇄체의 물성

2-3-1. 다공성 피인쇄체의 지료 조성

다공성 피인쇄체의 종류 중 특히 신문용지에 요구되는 품질 특성은 크게 2가지로 구분할 수 있다. 첫째는 인쇄 공장에서의 생산성 향상과 안정한 작업성이고, 둘째는 서비스 향상에 관한 인쇄적성이다. 이와 관련하여 1970년대 이전에는 오목판 인쇄기의 시대로서 신문용지에 있어서 작업성 보다 잉크의 착색성과 같은 인쇄적성이 중요시 되었다. 따라서 용지의 강도는 떨어지지만 평활성이 높고, 탄력성이 있는 GP(groundwood pulp), RGP(refiner groundwood pulp)의 기계 펄프가 주로 사용되었다. 그러나 1970년대 이후에는 인쇄면의 품질이 좋으면서 고속 인쇄가 가능한 오프셋 윤전기가 도입되어, 용지에 있어서 인쇄적성보다는 단재, 주름, 지분과 같은 작업성이 중시되었다. 따라서 강도가 좋은

KP(kraft pulp), TMP(thermo mechanical pulp)로 전환이 되었으며, 고지의 활용 면에서 DIP(deinking pulp)가 혼용되기 시작하였다. 국내에서 생산되고 있는 신문용지의 지료 조성은 거의 DIP가 80~90%를 차지하고, 나머지가 TMP, KP순으로 구성되어 있다. 하지만 일본에서는 현재 43 g/m^2 이하의 경량지가 생산되고 있으므로 용지의 물리적인 강도 문제로 인해 DIP의 사용을 최대 60%까지로 제한하고 있다.

2-3-2. 피인쇄체의 물리적 성질

피인쇄체의 물리적 성질 중에서 종이의 평량(basis weight)은 각종 물리적 성질, 광학적 성질 및 전기적 성질에 영향을 미친다. 그리고 각각의 특성에 맞는 피인쇄체의 평량이 요구된다. 다공성 피인쇄체 중 신문용지의 경우는 저평량 타입으로 롤(roll) 단위로 거래된다. 또한 공기 중의 습기와 접촉하는 피인쇄체는 그 만큼의 평량에 변화를 보여준다. 따라서 미국에서는 23°C 에서 습도 50%를 기준으로 하고 있다.

종이 두께(thickness)는 두께 자체보다는 두께의 균일함이 더욱 중시되고 있다. 밀도(bulk density)는 종이의 투기성, 물리적 강도 및 광학적 성질 등을 좌우하며, 그 크기는 섬유 펄프화 정도와

방법, 리파이닝(refining)정도와 유연성에 크게 의존한다. 밀도의 증가는 투기성과 불투명도를 떨어뜨리며 강도를 증가시키는 경향이 있다. 하지만 강도 중에서 인열강도는 떨어지는 경향이 있다.

종이의 기공도(porosity)는 잉크의 수용성에 크게 영향을 주는 인자로서 침투건조를 기본으로 하는 신문용지에서는 아주 중요한 변수로 작용한다. 또한 종이의 평활성(smoothness)과 거칠기(roughness)는 상호 반비례적인 관계를 나타낸다. 평활도는 종이의 외관을 수려하게 만들기 때문에 인쇄적성에 아주 중요한 특성 중의 하나이며 종이의 광택에 많은 영향을 준다. 종이의 평활도 증가를 위하여 코팅 처리 및 캘린더링(calendering)처리를 한다.

2-3-3. 피인쇄체의 광학적 성질

피인쇄체의 광학적 성질은 종이의 외관을 크게 좌우하기 때문에 중요한 성질로 간주된다. 외관 뿐 아니라 용도에 부합되는 성질을 부여하는 주요 광학적 성질로는 색, 백색도, 불투명도 및 광택 등이 있다.

광택(gloss)은 빛을 정반사하는 물질 표면의 성질로 종이 표면은 평활도와 인쇄품질과 밀접한 관계를 가지고 있다. 광택은 입사된 빛의 반사량을 측정하여 기준면에 대한 비의 백분율로 표시

한다.

종이의 백색도(brightness)는 밝기 또는 종이의 전반적인 반사 특성을 의미한다. 실제의 백색도는 펄프의 표백 정도를 평가하기 위하여 고안된 것이다. 백색도와 화이트니스(whiteness)는 그 의미의 사용이 일반적으로 같지만 엄밀히 구분해서 백색도는 밝음이라는 의미에서 명도의 의미가 크게 작용하고, 화이트니스는 의미 그대로 어떤 물질의 하얀 정도를 표시한 것이다. 백색도에 영향을 많이 주는 것으로는 펄프의 표백만이 아니라 염료, 착색 안료, 충전용 안료 및 불순물이 주요한 인자로 고려된다.

용지의 불투명도(opacity)는 용지에 의하여 투과된 빛의 양에 의해서 결정된다. 종이의 경우 대부분 빛이 산란과 확산, 투과되는 특성을 지니고 있기 때문에 투명체라기보다는 오히려 반투명체에 속한다. 불투명도의 측정은 반사율을 측정하는 장치면 모두 사용이 가능하나, 측정값이 광원의 특성, 빛의 조사 및 측정 구조, 백킹(backing) 재료의 반사 특성 등에 의하여 달라지기 때문에 표준화된 불투명도를 얻기 위해서는 측정장치의 표준화가 필요하다. 따라서 불투명도 측정을 위하여 TAPPI, SCAN, ISO, CPPA, APPITA, JIS, KS 등 각 표준 측정 방법에서 측정 장치 및 방법에 대해서 규정하고 있다.

2-3-4. 기공의 직경

Washburn 방정식에 의하여 기공의 직경은 식 (20)과 같이 나타낼 수 있다.

$$D = \left(\frac{1}{P}\right)4\gamma\cos\theta \dots\dots\dots (20)$$

식 (20)에서 D는 기공의 직경, P는 압력, γ 는 표면장력, θ 는 접촉각이다. 이 때, γ 와 θ 가 결정된 상태에서 D는 P에 의한 함수로 나타낼 수 있다.

2-3-5. 기공의 개수

일반적으로 모세관에 의해 피인쇄체 내부로 침투(penetrates)되는 액체의 침투는 식 (21)과 같이 Young-Laplace 방정식과 포이즐리의 법칙(Poiseuille's law)의 조합으로 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{d_1}{d_t}\right) = \frac{2\gamma \times r \cos\theta + \Delta P_e r^2}{8\eta l} \dots\dots\dots (21)$$

식 (21)에서 l 은 침투거리, γ 는 표면장력, r 은 모세관 반경, ΔP_e 는 외부압력, θ 는 접촉각, η 는 액체의 점도이다. 따라서 미분방정식인 식 (20)을 적분하여 정리하면 식 (22)와 같이 액체의 침투거리를 구할 수 있다.

$$l = \left(\frac{2\gamma \times r \cos\theta + \Delta P_e r^2}{4\eta} \right)^{\frac{1}{2}} \times (t)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (22)$$

만약, 피인쇄체 내부에 단위 면적당 n 개의 모세관이 있다고 가정할 경우 단위 면적당 침투되는 액체의 부피(V_A)는 식 (23)과 같이 정리 할 수 있다.

$$V_A = n\pi r^2 \left(\frac{2\gamma \times r \cos\theta + \Delta P_e r^2}{4\eta} \right)^{\frac{1}{2}} \times (t)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (23)$$

식 (23)에서 피인쇄체 두께가 일정하여 액체의 침투거리 l 이 일정하다고 가정할 경우, 피인쇄체의 기공부피와 기공의 직경을 이용하여 피인쇄체의 상대적인 기공 개수(n_r)를 식 (24)와 같이 계산 할 수 있다.

$$n_r = \frac{V_A}{\pi r^2 l} \dots\dots\dots (24)$$

2-4. 유한요소법

2-4-1. 전산유체역학

전산유체역학(computational fluid dynamics, CFD)이란 유체역학과 수치해석을 병합시켜 수학적으로 풀기 어려운 비선형 편미분 방정식들(non-linear partial differential equations)의 근사해를 구하는 학문으로서 유체의 흐름(동적인 움직임)을 실험에 의한 측정적 방법이 아닌 컴퓨터를 이용한 수치 해석적 방법을 이용하여 계산하는 것이다. 인쇄공학 분야에도 이 전산유체역학을 이용하면 실험적인 방법에 의해 규명하기 힘들고 연구하기 어려운 부분에 대한 연구가 가능해지고, 인쇄공학의 발전과 인쇄공정의 자동화 및 과학화가 더욱 발전할 것이다.

전산유체역학으로 유동해석을 푸는 방법 중 FEM(Finite Element Method)은 유한요소법이라고 하여 이름 그대로 유한의 사이즈의 요소로 연속체로 분할하고, 전체는 요소의 집합체로써 표현하는 방법이다. FEM에서는 대표점을 절점(node)이라고 하고, 보간식

이 적용되는 부분영역을 요소라 한다. 이런 발상은 1차원 영역이나 2차원, 3차원 연속체에서도 마찬가지이다. 이때 잘게 분할을 하면 결과적으로 FEM 모델이 그물망처럼 보이므로 통상 메시라고 한다. 메시는 깨끗이 정리된 격자로 만들 필요는 없다. 중요한 것은 인접한 요소끼리 절점을 공유하는 것이다. 다르게 말하면 2차원의 경우는 요소의 가장자리끼리, 3차원의 경우는 면끼리 정확하게 만나도록 영역을 요소로 구분한다. 메시가 너무 듬성하면 결과의 정확성이 떨어지고 요소를 충분히 작게 하고 모델을 더욱 상세하게 한다면 결과는 더 좋게 평가될 것이다. 듬성한 메시는 저장되지 않는 오류를 발생시키기 때문에, 결과를 유심히 살펴보고 우리가 생각한 결과에서 얼마나 크게 오차가 발생하였는지를 판단해야 한다. 따라서 양질의 메시지를 생성하는 것이 중요한 과제이다.

FEM은 연속체 문제라 불리는 공학의 여러 문제를 수치계산에 의해 근사적으로 구하는 것으로 그 적용분야는 아주 광범위하다. 그 중 고체역학이나 구조역학, 그리고 유체역학은 FEM이 가장 많이 이용되는 분야로 인쇄공학 뿐만 아니라 거의 모든 공학 분야에 적용가능하다.

2-4-2. 수학적 모델링

R2P시스템의 수학적 모델링은 Fig. 3과 같이 판과 압통(impression cylinder) 사이에 잉크가 들어가서 전이되는 시스템으로 유체의 압력분포, 속도구배 등과 관련하여 유체가 롤러와 판의 nip부분을 통과할 때 내부압력의 변화는 다음과 같이 계산할 수 있다.

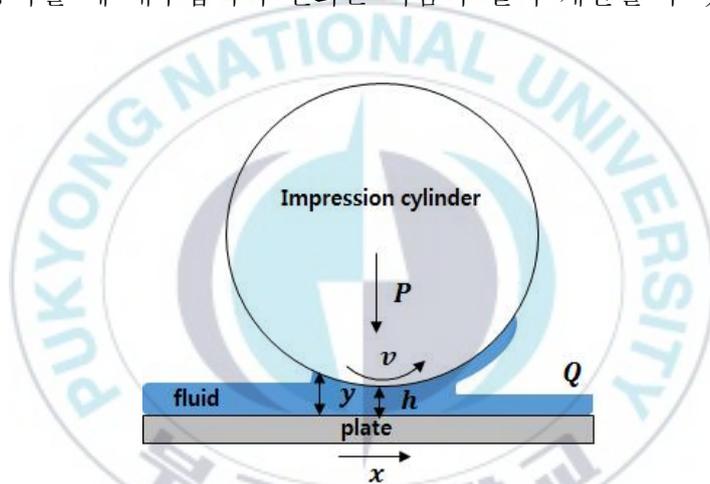


Fig. 3. A schematic diagram between plate and impression cylinder.

$$\frac{dP}{dx} = \eta^n \frac{d^2v}{dy^2} \dots\dots\dots (25)$$

식 (25)에서 P 는 압력, x 는 이동 거리, v 는 압통의 회전 표면

속도, y 는 plate부터 수직방향으로 거리, η 는 유체 점도, n 은 비뉴턴성 유체를 나타내는 Power law index, h 는 plate와 압통 사이의 거리이다. 그리고 순간적으로 유체가 nip 사이를 빠져나오는 유량(Q)은 다음과 같다.

$$Q = \int_0^h v dy \quad \dots\dots\dots (26)$$

$$h = h_0 + \frac{x^2}{2R} \quad \dots\dots\dots (27)$$

$$\frac{dP}{dx} = 12\eta^n \left(\frac{U}{h^2} - \frac{Q}{h^3} \right) \quad \dots\dots\dots (28)$$

식 (26)의 h 는 판과 압통 사이의 거리를 나타내며 다음 식 (27)과 같이 구할 수 있다. 여기에서 h_0 는 판과 압통 사이의 가장 근접한 거리를 나타내며, R 은 압통의 반경을 나타낸다. 식 (28)은 압력 구배를 나타내며 여기서 U 는 압통의 표면 속도를 나타낸다. 이와 같은 방법으로 전단 속도, 속도 분포 등도 구할 수 있다.

위의 식 (25), (26), (27), (28)로부터 식 (29)와 같이 인쇄 압력을 계산 할 수 있다.

$$P = \frac{3\eta^n}{h_0} \left[\left(2U - \frac{3Q}{2h_0} \right) \left(\frac{x}{h} - \frac{x_2}{h_2} + \sqrt{\frac{2R}{h_0}} \left(\tan^{-1} \frac{x}{\sqrt{2Rh_0}} - \tan^{-1} \frac{x_2}{\sqrt{2Rh_0}} \right) \right) - Q \left(\frac{x}{h^2} - \frac{x_2}{h_2^2} \right) \right] + p_2 \quad \dots\dots\dots (29)$$

2-4-3. 시뮬레이션의 구성

시뮬레이션은 복잡한 문제를 해석하기 위해 모델에 의한 실험 등을 해결하는데서 실제와 비슷한 상태를 수식 등으로 만들어 모의적으로 연산을 되풀이하여 그 특성을 파악하는 것을 말한다.

즉, 실제 또는 가상의 동적 시스템 모델을 컴퓨터를 사용하여 연구하는 것을 말하며 모의실험 또는 모사라고도 한다.

시뮬레이션은 플라스틱, 고무, 유리, 피, 음식물처럼 일반적인 유동을 하지 않는 물질들의 이론적으로 계산하기 어려운 부분을 포함하고 있다. 관련된 복잡한 수식으로 압축, 팽창, 점도, 온도 등의 다양한 조건 값을 컴퓨터가 모두 계산하여 예측하기 어려운 물질에 대한 결과물을 눈으로 볼 수 있도록 하는 것이다.

시뮬레이션 소프트웨어의 기본 구성은 전처리 장치로 polydata, 해석장치로 fluent, polyflow, airpak, 후처리장치로 fieldview, polystat, cad 등이 있다.

(1) Geometry set up

Geometry는 전산유체역학 방법의 전처리장치중 하나로 기본적인 도형이나 입체 등의 기하학적인 형상을 그릴 수 있다. 3D 또는 2D 환경을 만들 수 있고 고체와 유체를 구분 하는 작업을 하게 된다. 유체 해석 프로그램의 가장 기본 단계에 해당한다.

(2) Mesh

시뮬레이션에서 해석하고자하는 도형 및 입체 등을 자르는 과정을 메시 단계라고 하며 선과 선이 만나는 절점에서 해석이 가능하게 한다. 각각의 입체 및 면에 값을 넣어줄 위치를 정하는 단계이며 geometry와 마찬가지로 시뮬레이션 준비 단계에 속한다.

(3) Polydata

Polydata에서는 앞에서 geometry, mesh 단계를 거쳐 완성된 모델에 변형시키고자 하는 값을 입력한다. 경계조건(boundary condition) 및 점도, 속도, 온도 등의 물성과 수치해석 조건 등을 부여하는 데이터 프로세서(data processor)이다.

(4) Polyflow

Polyflow는 고분자 및 고무 가공, 유변학, 유리변형 등 비뉴턴성 유체와 관련된 응용분야에 널리 사용된다.

Polyflow의 이론적인 기반은 연속체 역학(continuum mechanics) 및 유체의 유변학적 거동을 묘사할 수 있는 현상학적인(phenomenological) 또는 동역학적인(kinetic) 이론적 모델에 의해서 만들어진다. 이는 뉴턴성 유체뿐만 아니라 탄성이 없는 비뉴턴성 유체 모두에 있어서의 여러 가지 필수 구성 모델을 제공한다.

Fig. 4는 시뮬레이션 소프트웨어를 이용하여 작업하는 순서를 나타낸 것이다.

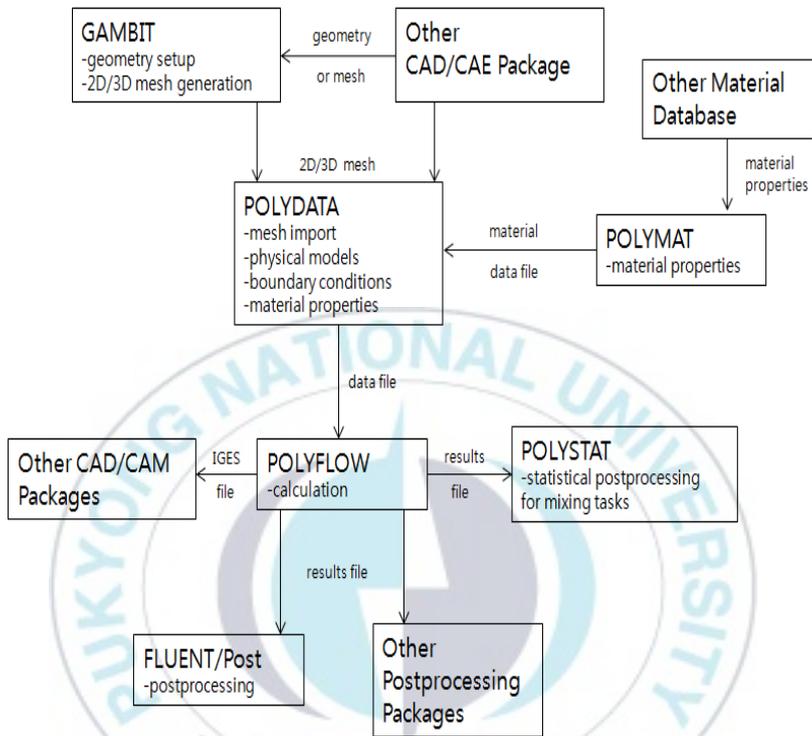


Fig. 4. The procedure of simulation by POLYFLOW.²¹⁾

3. 실험

3-1. 실험재료

실험결과를 시뮬레이션 결과와 비교하기 위해서 실험에 사용한 시료의 물리적인 특성과 동일하게 시뮬레이션에 적용시켜 주어야 한다. 시료는 폭 넓은 범위의 점도를 실험하기 위해 PDMS를 사용하였다. 본 연구에서 사용한 PDMS는 일본 Shinetsu사의 모델 KF-96으로서 그 물성은 Table 1과 같다.

Table 1. Physical Properties of PDMS Samples

Factor	Properties
appearance	transparent
viscosity(poise)	10, 50, 100, 300, 500, 2000
specific gravity	0.97 (at 20℃)
refractive index	1.403 (at 20℃)
pour point (℃)	-50
flash point (℃)	315

PDMS는 다양한 점탄성을 가진 시료를 사용하였으며 PDMS를 선택한 이유는 내수, 내약품성, 내열성이 우수하여 사용하였다. 또한 PDMS는 투명하고 염료에 의해 염색도 가능하여 거동 현상을 눈으로 직접 관찰 할 수 있기 때문이다. 또한 기공도가 차이가 있는 4종류의 피인쇄체를 사용하여 실험을 진행하였고, 그 물성은 Table 2와 같다. 다공성 피인쇄체로는 시판의 크로마토그래피 용지와 갱지 및 모조지 등 각각 기공도가 다른 시료를 수집하였고 시료별 기타 물성 차이가 본 실험에서 얻고자하는 결과에 큰 영향을 미치지 않는 범위의 시료를 선택하였다.



Table 2. The Properties of Papers

Uncoaed paper	A	B	C	D
Basis weight	48.4 g/m ²	27.2 g/m ²	48.0 g/m ²	47.0 g/m ²
Thickness	65.0 μm	63.0 μm	69.0 μm	69.0 μm
Moisture	7.7%	8.6%	8.4%	8.2%
Ash content	10.3%	12.2%	9.0%	6.8%
Whiteness	57.3%	55.8%	55.3%	55.7%
Color L	76.4%	76.2%	75.2%	75.8%
Opacity	97.3%	–	97.2%	97.3%
Print through	4.9%	–	–	–
Smoothness	47/46 s	35/35 s	66/62 s	50/45 s
Tensile strength	4.3 kgf	3.8 kgf	3.9 kgf	4.3 kgf
Tear strength	41.0 gf	25.0 gf	43.0 gf	43.0 gf
Roughness	4.3 μm	4.0 μm	3.6 μm	1.9 μm
Porosity	350	420	457	470
Formulation	83.5	88.0	98.0	100

3-2. 실험장치

3-2-1. 오프셋 인쇄적성시험기

유체의 동일한 두께와 균일성이 요구되는 본 실험에서 일정 속도와 압력 상 시험인쇄를 할 수 있는 오프셋 인쇄적성시험기(offset printability tester, IGT-C1, Holland)를 사용하였으며, 이 장치는 100 N에서 1 kN까지 실린더 압력의 변화를 주면서 실험할 수 있게 되어있는데 외형은 Fig. 5와 같으며 주요 사양은 Table 3과 같다.



Fig. 5. Photography of the printability tester, IGT - C1 model.

**Table 3. Experiment Conditions of Offset
Lithographic Printing**

Factor	Properties
total time(sec)	45
pressure(N/cm ²)	100 ~ 1000 (10step)
printing area (cm ²)	77 (3.5W×22L)
roll speed(cm/s)	30
roll size(mm)	60

3-2-2. 농도계

오프셋 인쇄적성시험기로 인쇄된 피인쇄체별 유체의 전이특성 및 농도를 측정하기 위한 장치는 Fig. 6과 같이 X-rite사의 Densieye 농도계를 사용하였다. Densieye은 반사식 농도계(reflection densitometer)로서 인쇄 색 재현작업(reproduction work), 인쇄품질관리, 인쇄물의 객관적 평가방법에 많이 사용되며 인쇄적성을 연구방법 중 가장 쉽고, 많이 사용되는 장치이다.

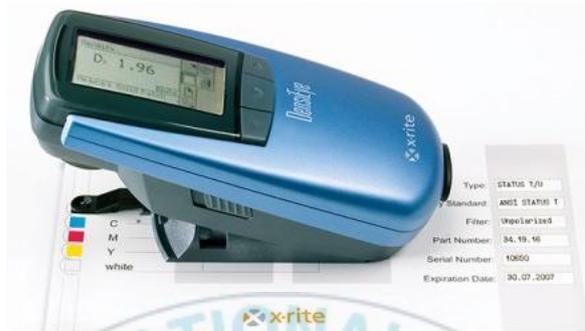


Fig. 6. Photography of the densitometer, X-rite densieye model.

3-3. 시뮬레이션

R2P의 시뮬레이션을 위해서는 첫째, 시스템의 단순화 둘째, 유체 전이 구조의 가정이 필수적이다. R2P 시스템은 한 쪽 방향으로만 유체가 거동한다고 가정하였을 때 단순화할 수 있다. 그리고 롤과 플레이트 사이의 nip에서 유입된 유체는 nip의 중심부에서 최대압력을 받다가 nip의 출구를 빠져나간다고 가정한다. 출구를 빠져나온 유체는 플레이트로 전이되고 전이되지 못한 나머지는 다시 돌아서 다음에 유입되는 유체와 혼합 된다. 이러한 모

든 과정에서 유체의 흐름이 정상상태가 된다고 가정하여 시뮬레이션 하였다. 롤과 플레이트의 nip은 매우 협소하여 nip을 통과하는 유체의 양으로 결정된다. 둘째로 중요한 점은 nip의 출구를 나온 유체의 어느 부분이 분리하는가를 시뮬레이션 하여 분리점을 찾는 것이다. 이 분리점을 시뮬레이션으로 발견하기 위해 본 연구에서는 공동이론 또는 캐비테이션 이론을 적용하였다. 공동이론이란 유체를 교반할 때 생성되는 공동, 종이의 요철, 거칠기에 의해 발생하는 공동 등이 유체 속에 생성되는 것이고, 캐비테이션 이론은 nip의 출구부분에서 부압력에 의해 공동이 확장되고 필라멘트가 생기며, 결국 끊어져서 분열한다고 가정하는 것이다.²¹⁾ R2P 시스템의 시뮬레이션은 유체의 흐름이 한 방향이고 내부에 와류가 없다고 가정하였다.

시뮬레이션의 모델은 Fig. 7과 같이 IGT 인쇄적성 실험 장치와 동일한 60 mm의 직경, 회전속도 30 cm/s와 같이 지정하였다. 그리고 롤러의 nip 부분에서 발생하는 유체의 거동과 공동 현상을 계산하기 위한 시뮬레이션의 도메인은 Fig. 8과 같다. nip 사이의 유체 전이특성을 시뮬레이션하기 위해 기본 도메인은 2D로 하고, 시뮬레이션 계산 시간을 고려하여 약 780개의 mesh를 설정하였다.

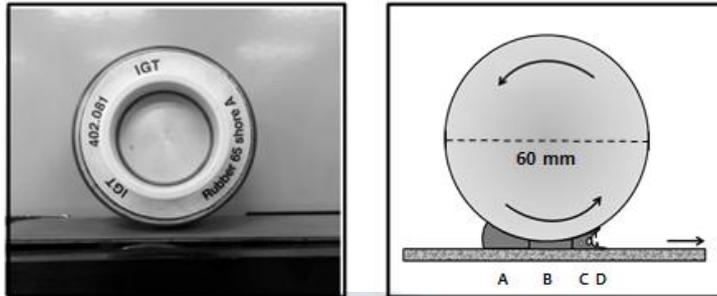


Fig. 7. A part of IGT printability tester(left) and the simulation model(right) of the roll to plate system. (A is the bank, B is the laminar, C is the pore and D is the filament region.)

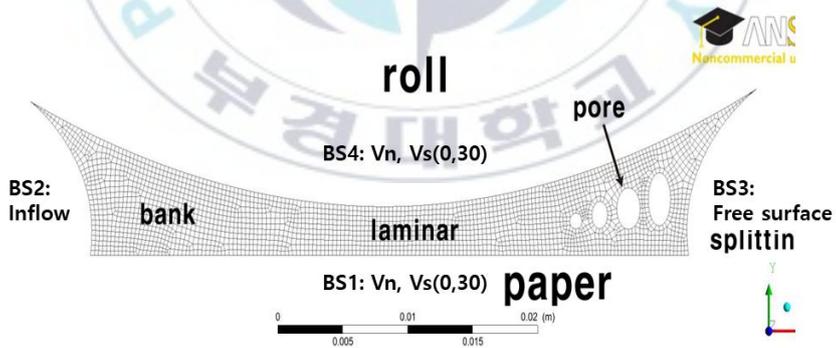


Fig. 8. Geometry of the R2P system and the boundary surfaces(BS) with free surface for simulation.

기본적인 도메인은 1개로 하였으며, 이 도메인(domain)에서 BS(boundary surface)1과 BS4를 롤과 플레이트 사이의 유체와 응접하도록 설정하고, BS4에 롤의 회전속도(30 cm/s)를 설정하여 선속도 값의 변화에 따른 유체의 거동을 계산하도록 설정하였다. BS2는 유체가 유입되고 있도록 설정하고, BS3은 자유계면으로 설정하여 유동현상과 분리점을 계산 하였다.

자유 계면은 롤과 플레이트의 nip에 해당하는 부분으로 힘에 의해 변형이 발생하는 곳으로서 유체의 점탄성과 표면장력의 변화에 따른 Navier-Stokes equation으로 계산하고, 결과 값에 따라 다시 격자가 재배열되는 부분이다.

자유 계면에 더해지는 힘과 그 힘에 대응하는 힘은 롤러를 회전하는 동시에 플레이트를 동일한 속도로 이동하면서 생기는 힘에 의하여 전단변형 하거나, 수직변형하게 되어, 특정 시간이 경과된 후에는 공동의 분열에 의해 유체가 찢어지고 종이로 전이되는 결과를 얻을 수 있다. 또한 공동 이론에 의하여 롤러와 플레이트의 nip에는 기공을 형성하여 주었고, 기공 주변의 유체 변화와 기공이 성장하여 분열하는 공동 과정도 역시 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션을 위한 유체모델은 단일 조성으로서 투명하고, 반응성이 낮으며 탄성과 점도를 수정하기 용이하다는 이점 때문에 PDMS(Poly dimethyl siloxane)를 사용하였다. PDMS는 전단

속도가 상승됨에 따라 점도 또한 증가하는 shear thickening의 성질을 가지는 물질이다. 따라서 본 연구에 사용한 시뮬레이션에서는 laminar 영역과 분열되는 지점까지를 정상적 상태로 가정하고, 뉴토니언 유체, 온도 조건은 단열로 설정하여 계산하였다. 그러나 인장되는 과정과 최종적인 필라멘트 분열 단계에서는 shear thickening 현상으로 점도가 상승하게 될 것이다.

모델 유체의 시뮬레이션 조건은 Table 4에 표기하였다. 압력, 선속도, 점도 등은 샘플 유체와 동일하게 하였으며, 상온실험을 감안하여 온도는 20°C로 일정하게 설정하였다. 한편, 모델링 작업 중 세부적인 정보가 요구될수록 많은 메시를 설정해야하고 결과 값에서 포아송비 2 이하인 메시를 생성하는 것이 시뮬레이션 계산 결과가 실측값에 잘 일치하기 때문에 중요하다. 따라서 본 시뮬레이션에서는 메시의 크기와 모양을 삼각형과 사각형 모양의 혼합 방식으로 1×10^{-4} m 크기로 설정하여 롤과 플레이트 nip 사이 뿐 아니라 유체전이 전 영역에 균일하게 적용시켜서 각각의 BS에서 유체의 흐름을 유효성 있게 계산하도록 설정하였다.

**Table 4. Flow Model of the PDMS and
the Condition of Simulation**

Condition of simulation for the offset printing	
system model	time dependent flow
flow model	generalized Newtonian isothermal flow
initial viscosity(poise)	6 each (10, 50, 100, 300, 500, 2000)
pressure(N/cm ²)	5 step (100, 300, 500, 700, 1000)
mesh size(m)	1×10^{-4}
re-meshing method	Lagrangian's global re-meshing
total time(sec)	45
temperature(°c)	20
surface tension(dyne/cm)	30
roll speed(cm/s)	30

상대적으로 많은 시뮬레이션 시간이 소요되므로 CPU(Central Processing Unit)시간과 효율성을 고려하여 유체 전이 모형을 2차원으로 계산하였다. 시스템 모델은 시간에 따라 유체의 변형을 파

약하는 time dependent flow 모델로 유체를 시뮬레이션 하였다. 도메인의 계산 과정과, 메시의 격자 재배열, 포스트 프로세서 등 점성, 점탄성 현상이 지배적인 유체 유동을 해석하도록 설계된 유한 요소법(FEM) 방식의 Polyflow를 사용하였다.

3-4. 실험방법

R2P 시스템의 nip 출구에서 유체의 분리점을 찾기 위한 실험은 일정 속도와 일정 압력에서 수행되어야 하며, 특히 유체의 두께와 균일성이 요구되어야 한다. 본 실험에서 오프셋 인쇄적성 시험기를 이용하여 인쇄압력 100, 300, 500, 700, 1000 N의 4단계로 압력의 변화를 주면서 PDMS를 기공도가 다른 4가지 시료에 인쇄를 하였고 유체의 두께(양) 조절은 부착된 IGT용 특수 피펫(IGT-408.200.031.D.001)을 사용하여 일정한 양을 공급하였으며 실험 조건은 Table 5와 같다.

**Table 5. Condition of the Printing Experiment
using by IGT**

Factor	Properties
total time(sec)	45
pressure(N/cm ²)	100, 300, 500, 700, 1000
printing area (cm ²)	77 (3.5W×22L)
roll speed(cm/s)	30
roll size(mm)	60
temperature(°c)	20

PDMS의 두께를 일정하게 유지하기 위해서 IGT 오른쪽에 장착되어있는 연육 장치에 시료를 특수 피펫으로 0.5 cc를 넣고, 오프셋 인쇄적성 시험기의 매뉴얼 값과 동일하게 30초간 연육 시킨 뒤에 다시 롤러를 교체하여 15초간 점착력에 의해 전이되게 한 후, 실험 전의 롤러의 무게 120 g과 PDMS의 전이 후의 롤러의 무게를 측정하고, 종이에 전이 된 롤러의 무게를 분석저울로 측정함으로써 PDMS의 양을 알 수 있도록 하였다. 실험 온도는 20°C로서 시뮬레이션 조건과 같다.

4. 결과 및 고찰

4-1. 공동의 성장과 분열

본 실험에서 사용한 PDMS는 길이가 늘어나는 성질이 크기 때문에 피인쇄체의 인쇄적성실험에서 뜯김 실험용 오일 (PTO, pick test oil)로 사용된다. 300 poise 정도의 점도를 갖는 PDMS는 필 테스트(peel test)에서 약 4~5개의 필라멘트가 생기고 분리되는 것을 예비실험으로 확인할 수 있었다. 실험적으로 이 필라멘트의 개수를 시료 별로 더 정확히 측정하는 것은 본 연구에서는 범위 안에 넣지 않았으나, 앞으로 고속 카메라와 특수 장치에 의해 촬영 분석할 예정이다. 정상상태에서 시뮬레이션한 결과 점도 10 poise의 PDMS는 초기에 Fig. 9에서 보는 바와 같은 메시 파일을 얻을 수 있었다. 첫 번째 공동의 직경은 초기에 주어진 조건으로서 PDMS의 교반과 공기 접촉에 의해 들어간 공동의 직경으로 간주한 것이다. 다음의 Fig. 10은 정지 상태에서 실험장치의 nip 폭을 나타낸 것이다. 그 폭은 12.4 mm이었으며, PDMS의 점도와 선속도에 따라서 nip의 폭은 달라졌다.

Fig. 9에서 W 는 오프셋 시스템에서 롤러와 피인쇄체 nip의 폭(width of nip)이며, nip의 폭은 롤러의 회전속도에 따라서 달라진다. 즉, 초기에 정지 상태에서 측정한 결과는 12.4 mm이었으나 정상상태에 도달하면 더 짧아진다. 그러나 본 연구에서는

회전 속도를 실험 장치들에 일치시켰기 때문에 회전 선속도를 변화시키지는 않았다.

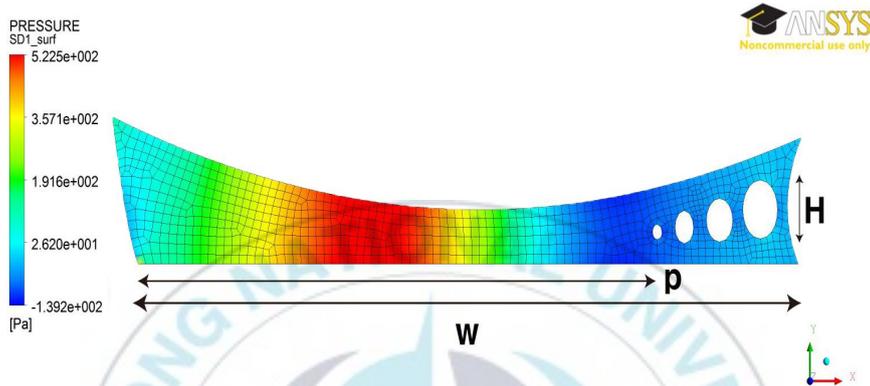


Fig. 9. Simulated mesh file of the ink (viscosity is 10 poise) in offset printability tester at initial state. (W is the width of nip, P is the distance to the start point of pore and H is the length of filament.)

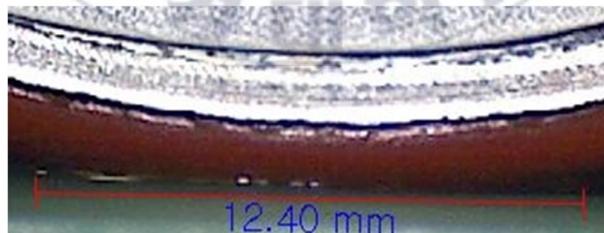


Fig. 10. The width of nip of IGT offset printability system.

Fig. 11은 정상상태에 도달했을 때 점도 10 poise의 유체의 시뮬레이션 결과이다. 캐비테이션이 발생하고 공동이 부압력에 의해서 늘어나며, 결국 필라멘트를 형성하고 분리되는 현상을 본 시뮬레이션 결과에서 해석할 수 있었다.

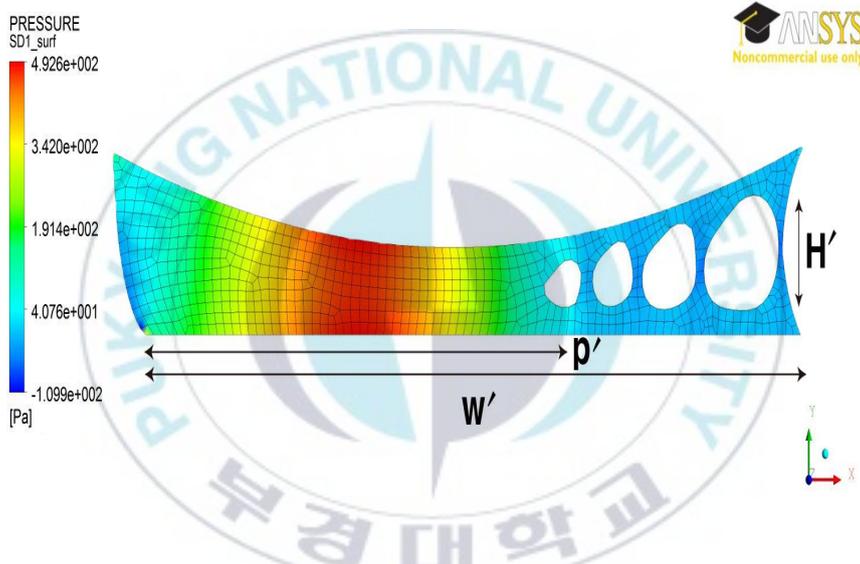
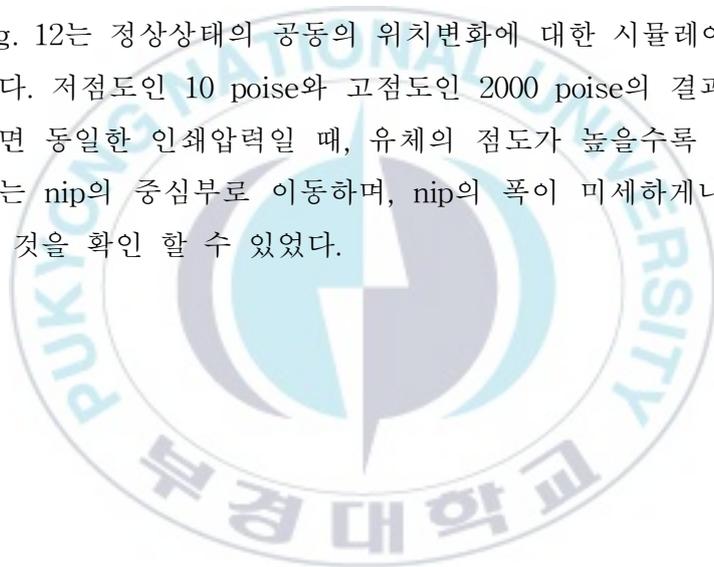


Fig. 11. Simulated mesh file of the fluid in the offset printing at steady state.

그러므로 이 시뮬레이션 결과들은 R2P 시스템의 nip에서 일어나는 유체의 거동과 분리점의 위치를 분석하는데 많은 도움이 될 것으로 생각된다. 한편 시뮬레이션 결과, 점도가 높은 유

체일 경우와 속도가 빠를수록 nip의 폭 W 가 줄어들어 가는 것을 알 수 있었다. 또한 시뮬레이션 결과로 유체의 흐름이 정상상태에 도달하면 Fig. 11과 같이 첫 번째 공동의 위치가 롤러의 좌측으로 이동하는 것을 알 수 있다. 즉 nip의 폭 W 가 줄어들고, 첫 번째 캐비테이션이 일어나는 지점까지의 거리 P 도 짧아지는 것을 알 수 있었다.

Fig. 12는 정상상태의 공동의 위치변화에 대한 시뮬레이션 결과이다. 저점도인 10 poise와 고점도인 2000 poise의 결과를 비교하면 동일한 인쇄압력일 때, 유체의 점도가 높을수록 공동의 위치는 nip의 중심부로 이동하며, nip의 폭이 미세하게나마 줄어든 것을 확인 할 수 있었다.



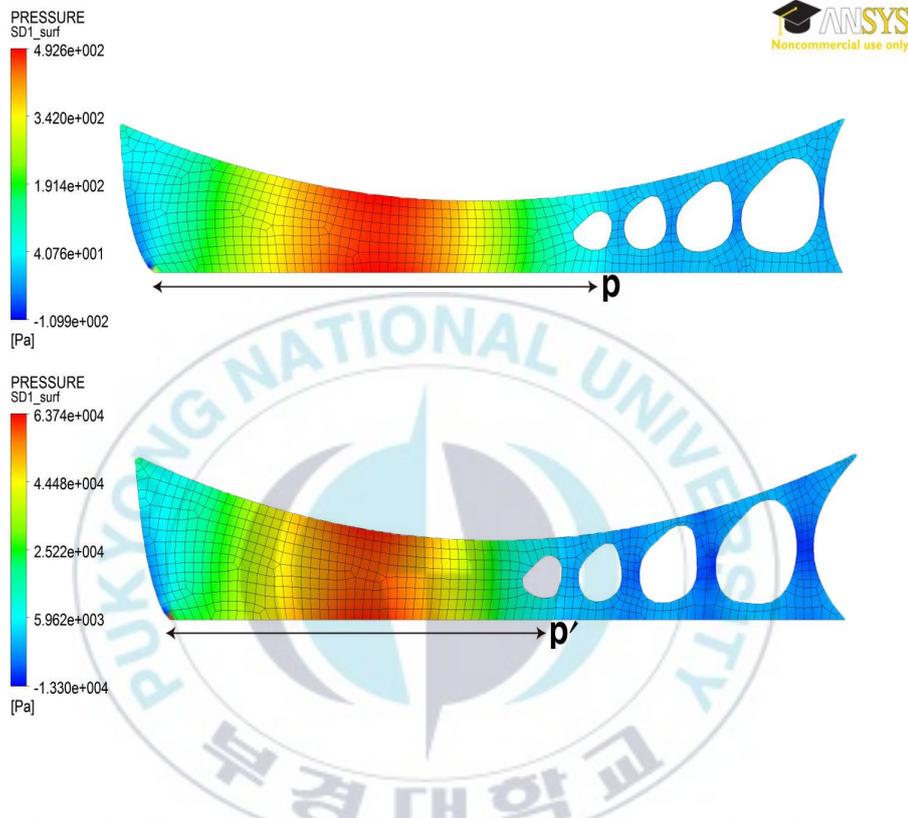


Fig. 12. The comparison of the simulation results about transition of pores.

(Top is the result of 10 poise viscosity and bottom is the result of 2000 poise viscosity.)

4-2. 압력과 점도의 영향

R2P 시스템에서 점도의 영향은 비뉴턴성 유체의 경우 점도 변수 하나의 영향보다는 점탄성을 같이 고려해야 한다. 그러나 본 실험은 일정한 점도에서 흐름이 정상상태일 경우를 시뮬레이션 했기 때문에 일반화된 뉴우턴성 유체로 취급했다. 또한 본 실험에서 점도의 영향은 점도 단독으로 영향을 주는 것 보다는 롤러의 압력과 인쇄 속도 등 다른 조건과 함께 영향을 주는 경우를 고려해야 했다. 왜냐하면 공동의 성장에는 점도, 압력, 인쇄시간, 표면장력 및 원심력 등이 함께 변수가 되고 피전이체의 종류에 따라서도 영향을 받기 때문이다. 시뮬레이션에 의한 전이율을 구하는 방법은 우선, nip의 출구에서 분리점을 구하고 그 분리점에 의해 전이율을 구하며, 이 전이율은 2차원적으로 시뮬레이션 한 것이기 때문에 다시 3차원으로 확대하여 전이량을 계산한다. 한편, 실험에 의한 전이율은 실린더의 실험 전과 후의 무게를 측정하여 계산하며, 인쇄물의 인쇄농도를 측정함으로써 확인하였다. 단, 시간이 지난 후에 용지 속으로 침투되어 들어가는 것은 종이의 뒷면 반사율 차에 의해 뒤비침(print through)을 측정하였다. 각각 점도가 다른 PDMS로 실험한 후 인쇄농도를 측정하여 전이율과 전이량을 산출한 결과는 Fig. 13, 14와 같다. 실험으로 측정한 전이량은 점도가 높을수록, 압력이 증가할수록 다소 증가한다. 그리고 어느 압력에서 최대 농도값을 갖게 된다. 그 이유는 두께가 어느 정도 두꺼워지면 농도값은 더 이상 증가하지 않기 때문이다.

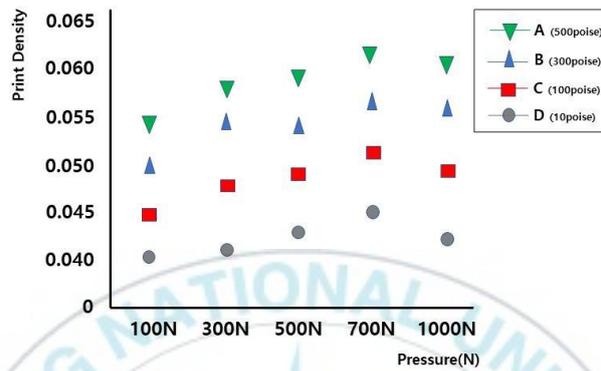


Fig. 13. Experimental results of optical density of PDMS in the offset printing system at steady state.

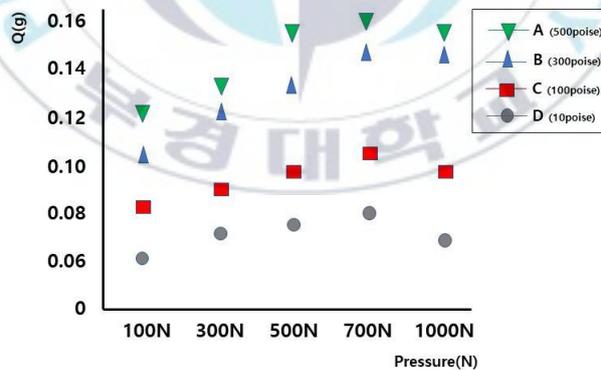


Fig. 14. Amount of transferred PDMS (Q) in the offset printing system at steady state.

이 최대 농도값 이후에는 PDMS의 두께와 농도값이 비례하지 않기 때문에 오차가 발생한다. 실험결과의 점도와 압력이 전이량에 비례하는 경향성은 시뮬레이션 결과와 유사함을 보여준다. 하지만, 실험결과는 시뮬레이션 결과와 완전히 일치하지 못하고 농도값의 ± 0.003 범위 내에서 그리고 전이량은 ± 0.005 범위에서 시뮬레이션 결과와 근사함을 알 수 있었다.

점도의 영향은 첫째, 공동의 성장과 상관관계가 있으며, 둘째 피전이체에 잉크의 침투 또는 접촉에 영향이 있을 수 있다. 본 실험에서와 같이 피전이체가 종이라면 종이의 기공에 의해 종이의 근처에서 공동이 발생할 가능성이 많기 때문에 분리점도 종이의 근처에서 만들어지고 결국 피전이체로 전이량이 감소할 것이다. 완전히 기공이 없는 플라스틱이나 금속 재질로 전이된다고 할지라도 표면의 거칠기나 표면의 불규칙한 접촉각 등은 잉크를 잡아주는 트래핑(trapping) 능력이 불균일하기 때문에 기공과 같은 역할을 하여 전이율에 영향을 줄 수 있다. 본 연구에서 사용한 PDMS는 점도가 높은 것일수록, 공동(또는 수 마이크로 단위의 작은 기포들)이 생길 가능성이 많다. 그 이유는 고점도 일수록 기포의 생성 속도보다 완화시간(relaxation time)이 길기 때문이다.

이와 같은 결과들은 PDMS에 기포가 들어가서 공동이 되어 추후에 nip에서 잉크가 분리될 수 있는 핵(nuclei) 들을 만들어 주기 때문에 고점도 일수록, 또는 기포들의 증가에 의해 전이율

을 증가시키는 원인이 될 수 있다고 본다. 속도 30 cm/sec에서 PDMS가 종이로 전이되어 분리될 때, 점도에 따라서 기포 형성이 달라지는 실험 결과가 Fig. 15이다.

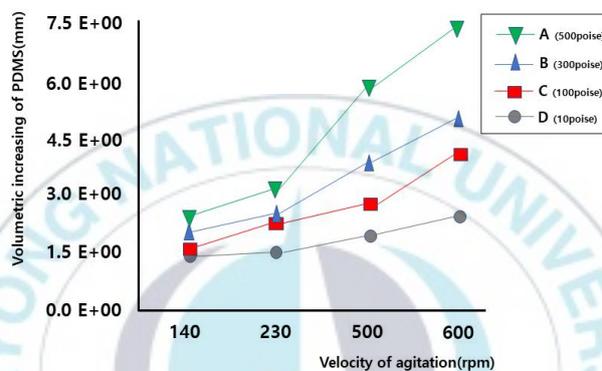


Fig. 15. Volumetric increasing of PDMS according to the formation of bubbles by agitation.

실험 결과에서 보는 바와 같이 높은 점도의 PDMS일수록 전이량이 증가하는데, 그 이유는 점도가 높을수록 캐비테이션이 일어나기 쉽고, 공동들은 분리의 핵으로 작용하여 필라멘트의 중심 근처에서 분열되기 때문이라고 볼 수 있다. 또한 공동의 성장 속도도 고점도 유체일수록 빨라져서 쉽게 분열하는 것을 시뮬레이션 결과로 알 수 있는데, 실험에서 얻어진 결과와 시뮬레이션 결과를 비교해보면 캐비테이션과 공동의 역할에 대해 잘 이해할 수 있고, 실험에서 예상했던 가정들과 일치한다는 것

을 알 수 있었다. 즉, 점도에 의한 공동의 형성과 분열의 결과에서, 컴퓨터 시뮬레이션 결과는 고점도일수록 공동의 분열이 중앙에서 일어나고 있음을 보여준다. 단 공동의 형성은 PDMS 전체에 균일하게 분포된다는 것을 전제로 하는 결과이다.

공동의 분포가 nip의 출구에서 불균일한 경우도 생각해 볼 수 있는데, 그것은 피전이체가 종이와 같은 다공성 물질일 경우이다.

본 실험에서는 180 gsm 등의 비도공지를 사용하였기 때문에 압력의 영향을 받았다. 즉, 롤러의 압력이 높을수록 PDMS의 전이량이 증가함을 알 수 있었다. 그 이유는 피전이체가 압력에 의해 PDMS를 잘 트래핑해 주기 때문이라고 생각한다. 그러나 피전이체가 다공성 종이이고 인쇄압력이 낮거나 인쇄속도가 빠르면 전이되는 핵이 될 수 있는 공동의 형성이 종이 방면에 형성될 가능성이 많아져서 전이율이 감소하게 된다. 이와 같은 가정도 역시 실험결과 및 시뮬레이션 결과와 거의 일치한다. 이 결과들은 Waker-Fetsco의 피복면적(coverage)의 이론²³⁾에 의해서도 설명될 수 있다. 압력이 없을 때는 요철이 있고 거친 종이의 표면이 전이되는 순간 nip에서 롤러의 압력에 의해 평평해지고 매끈해져서 접촉면이 넓어지기 때문에 피복저항이 줄어들어 전이량이 증가한다는 것과 일치한다.

4-3. 피인쇄체의 기공도에 따른 유체전이 영향

오프셋 인쇄방식은 인쇄판으로부터 전달된 잉크가 블랭킷에

다시 전이되어 피인쇄체 위에 인쇄되는 간접적 인쇄방식으로 오프셋용 인쇄잉크는 일정한 점도 값을 요구하는 특성을 가지게 되며 잉크의 점도 증가는 인쇄속도에도 영향을 미치게 된다.

특히 고속의 인쇄속도를 요구하는 신문 운전 인쇄용지와 같은 다공성 피인쇄체의 경우 침투 건조형 잉크를 사용하며, 피인쇄체의 특성상 종이의 기공도가 잉크의 침투성에 큰 영향을 미치게 된다.

Table 3과 같이 각각 기공도가 다른 피인쇄체를 IGT인쇄적성 시험기를 이용하여 일정한 속도에서 5단계의 압력, 속도를 변화시켜 피인쇄체에 전이된 유체의 농도를 측정하여 평균값을 산출한 결과는 Fig. 16, 17과 같다.

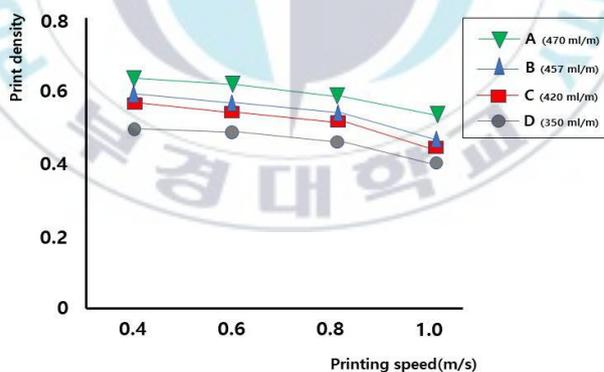


Fig. 16. Print density according to different printing speed.

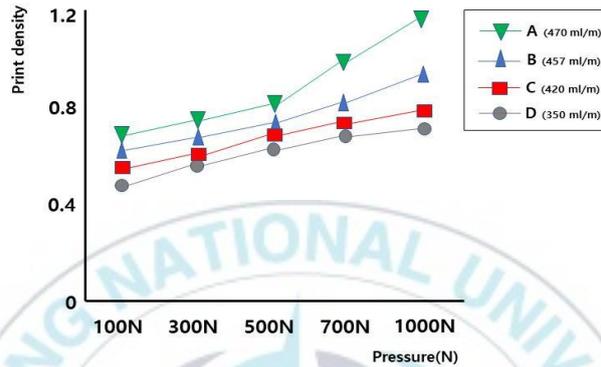


Fig. 17. Print density according to different pressure.

전체적으로 인쇄 압력이 커질수록 농도가 증가하고, 인쇄 속도가 커질수록 농도가 감소하였다. 하지만, 기공도가 클수록 압력의 영향을 크게 받는다는 사실을 알 수 있다. 기공도가 큰 피인쇄체는 압력이 높을수록 인쇄 농도가 상당히 증가하였지만, 기공도가 낮은 피인쇄체에서는 크게 영향을 받지 않았기 때문이다. 반면, 속도 변화에서는 전체적으로 농도변화가 영향을 크게 받지 않았다. 즉, 높은 기공을 가진 피인쇄체의 경우 물리적으로 압력에 훨씬 더 민감하게 반응하였다. 이는 기공이 클수록 공동의 생성에 영향을 주었을 것이고, 끊어지는 분리점이 피인쇄체로부터 멀어졌을 것이라고 추측된다.

4-4. 피인쇄체의 표면특성이 인쇄적성에 미치는 영향

오프셋 시스템은 앞서 기술한 바와 같이 인쇄판으로부터 블랭킷에 잉크를 전이시킨 후 피인쇄체에 인쇄되는 간접인쇄 방식으로 기타 인쇄 방식에 비해 피인쇄체의 높은 표면강도를 요구하는 인쇄공정이다.

피인쇄체가 어느 정도의 표면강도를 가지고 있지 못할 경우, 블랭킷에서 피인쇄체로 잉크가 전달되는 과정에서 잉크와 피인쇄체 표면 사이에 피인쇄체의 표면이 잉크에 뜯기는 피킹(picking) 현상, 즉 인쇄 트러블 슈팅이 발생하게 된다.

본 연구에서는 IGT 인쇄적성 실험장치를 이용하여 실제 오프셋 시스템의 인쇄 환경과 동일하게 모사하여 인쇄한 결과물에 대하여 피인쇄체의 표면강도를 측정하는 데니슨 왁스법(Dennison wax tester)에 의거, 피인쇄체의 표면강도 값과 피킹 저항성과의 상관관계를 알아보고자 하였다.

피인쇄체의 표면강도 측정방법 중 데니슨 왁스법은 접촉력에 차이를 둔 여러 개의 스틱(stick)을 이용하여 피인쇄체의 표면을 긁어내어 피인쇄체의 표면 벗겨짐을 측정하여 표면강도를 평가하는 방식이다. 본 실험에서 사용한 4개의 표면강도가 다른 다공성 피인쇄체를 시료로 설정하여 인쇄속도 변화, 유체의 점도변화에 따라 시료의 표면에서 피킹현상이 발생하는 지점까지의 거리(mm)를 피킹 저항성 값으로 가정하여 실험한 결과가 Fig. 18, 19이다.

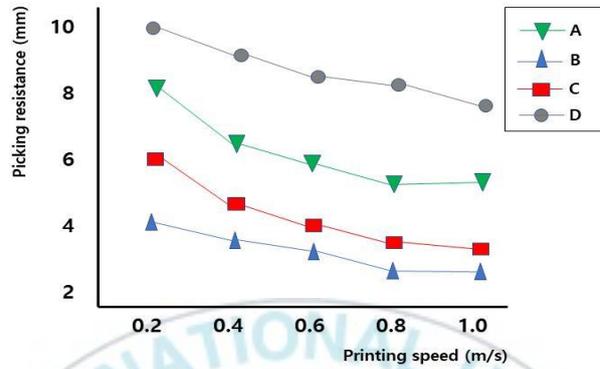


Fig. 18. Correlation of Dennison wax value and picking resistance value according to different printing speed.

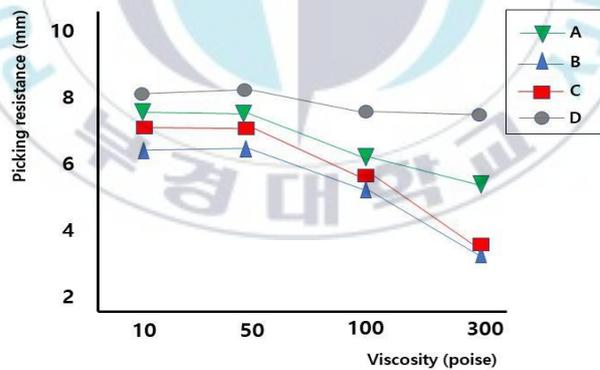


Fig. 19. Correlation of Dennison wax value and picking resistance value according to different viscosity.

Fig. 18과 같이 인쇄속도 0.2 m/s에서는 데니스 왁스법에 의한 표면강도 값과 피킹 저항 값이 비례하는 경향을 확인할 수 있다. 즉 가장 높은 표면강도를 가지는 시료의 피킹 현상이 발생하는 거리는 10 mm 였으나, 그 다음부터 표면강도가 높은 순서대로의 시료는 8 mm, 6 mm, 4.2 mm로 표면강도와 피킹 현상이 상호 비례하는 경향이 확인되었으나 이러한 경향은 인쇄속도가 빨라질수록 점차 비례 폭이 감소하여 0.8 m/s 이상의 속도에서는 시료의 표면강도와 관계없이 동일한 피킹 저항성을 가지는 결과를 확인할 수 있었다.

이 결과로 미루어 볼 때 피인쇄체의 표면강도와 피킹 저항성은 일정 속도 이상에서는 상관관계가 적음을 판단할 수 있었다.

Fig. 19와 같이 PDMS의 점도 변화에 따른 피킹 저항성 실험 결과로 보았을 때 표면강도가 가장 높은 시료는 PDMS의 점도를 10 poise에서 300 poise로 4 step으로 증가시켜도 피킹 저항성 값의 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다. 그러나 표면강도가 가장 낮은 B와 C 시료는 PDMS의 점도 값이 증가될수록 피킹 저항성 값이 급격히 저하되어 PDMS 점도 값 100 poise에서 4.2 mm, 4.6 mm로 저하되는 경향을 확인할 수 있었다.

인쇄속도와 PDMS 점도가 일정한 조건(roll speed : 30 cm/s, PDMS tack value : 100 poise)에서 인쇄압력을 변화시켜 실험한 결과는 Fig. 20과 같다.

인쇄압력이 100N에서 500N으로 증가될수록 피킹 저항성이 감

소하는 경향을 확인할 수 있으나 표면강도가 높은 6A 시료는 피킹 저항성의 감소가 미비하게 관찰되어 인쇄압력 변화에 크게 영향을 받지 않는 결과를 확인할 수 있었다.

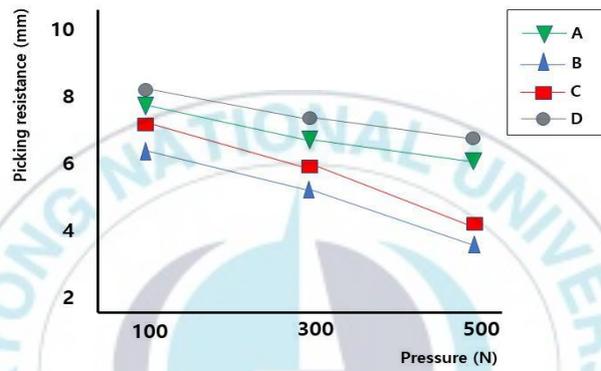


Fig. 20. Correlation of Dennison wax value and picking resistance value according to different pressure.

4-5. 시뮬레이션에 의한 전이율 계산

R2P 시스템에서 PDMS의 전이율에 관한 실험결과들은 시뮬레이션 결과와 거의 비슷한 경향을 가진다. 시뮬레이션과 PDMS에 의한 실험조건을 동일하게 하였고 IGT 실험 장치에서 롤러의 압력을 각각의 100~1000 N 범위에서 5단계로 나누어 시뮬

레이션 하였다. 같은 조건으로 종이에 전이된 양을 예측 하였으며, 종이에 전이된 양은 2차원적인 시뮬레이션인 관계로 면적×실린더 길이로 계산하였다. 이 값(면적)들은 2차원적 결과에서 얻은 것이기 때문에 롤러의 nip에서 z-방향 와류가 있거나 정상상태에 도달하지 못한 경우는 3차원적인 시뮬레이션을 수행해야 할 것이다. 그러나 본 실험은 롤러의 회전속도가 충분히 빠르다고 생각되고 롤러의 축방향의 흐름이 거의 없다고 볼 수 있기 때문에 그 값들은 매우 유효하다고 생각된다. 오프셋 인쇄에서 피전이체가 종이라면, 종이의 침투현상을 고려해야 한다. 즉, 전이율이 높지만 인쇄 농도, PD(print density)가 높지 않은 것은 용지의 내부로 PDMS가 침투되어 들어갔기 때문이다. 이것은 용지 뒷면의 농도, PT(print through)를 측정하여 알 수 있으며 이런 경우는 PT가 높다. 그러므로 종이에 전이된 후의 시뮬레이션과 실험값의 비교 오차는 PT에 의해 보정할 수 있다. 이와 같은 시뮬레이션 결과들은 실험에 의해서 직접 관찰할 수 없는 오프셋 인쇄의 nip에서 일어나는 현상들을 이해할 수 있도록 해주고 또 그 결과 값들이 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 논문은 R2P 시스템에서 nip출구의 잉크 거동 해석과 분리점에 관해 연구한 것이다. R2P 시스템의 nip출구에서 일어나는 공동의 변화를 Navier-Stokes식에 의해 컴퓨터 시뮬레이션하고, 실제 오프셋 실험에서 전이량 결과와 비교하였다. 모델 유체는 PDMS를 사용하였으며, 실험기는 IGT 인쇄적성시험기를 사용하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 시뮬레이션 결과, 정상상태에서 점도가 높은 PDMS 일수록 nip의 폭이 협소하고, 공동의 위치는 중심부로 이동하며, 전이율이 증가한다. 이것은 고점도에서 공동의 발생이 많아지기 때문이다.
2. 인쇄의 압력이 증가하면 피복저항이 줄어들고 피복면적비가 늘어나 전이량이 증가하는 것을 시뮬레이션 결과 확인할 수 있었다. 피복면적비의 증가는 농도값 ± 0.003 , 전이량 ± 0.005 범위로 시뮬레이션 계산 결과와 일치하는 것을 확인할 수 있었다.
3. 인쇄물의 농도와 전이량 및 뒤비침 값을 측정하면 피복저항의 영향이 계산가능 하므로 시뮬레이션의 값을 수정하여 보정할 수 있다.

4. 기공도가 클수록 인쇄 압력의 영향을 많이 받으며 높은 인쇄 압력에 의해 공동이 분열되는 지점이 중심부로 이동하며 전이율이 증가하기 때문이다.
5. 인쇄 속도가 빠를수록 기공도와는 무관하게 인쇄 농도가 감소하였고, 이는 빠른 인쇄 속도에서는 유체가 전이되는 시간이 짧기 때문에 기공도에 의한 영향을 받을 시간이 부족했다고 사료된다.
6. 피인쇄체의 표면강도가 높을수록 인쇄 속도와 PDMS 시료의 인쇄트러블(피킹)에 대한 저항성이 높은 결과를 보였으나 0.8 m/s 이상의 인쇄 속도에서는 표면강도와 관계없이 동일한 인쇄트러블 저항성을 가지는 결과를 확인하였다. 이 결과로 피인쇄체의 표면강도와 인쇄트러블 저항성은 일정 속도 이상에서 상관관계가 낮음을 알 수 있다.
7. 본 연구결과 유체의 점도와 인쇄압력 및 피인쇄체의 기공도가 클수록, 전이율이 증가하여 균일하고 높은 품질의 인쇄물을 얻을 수 있었으나 PDMS 시료의 수집범위(10~500 poise) 모두 700 N 이상의 인쇄 압력에서는 다소 품질이 하락되는 결과를 보여 인쇄 압력 700 N 이상 구간에서는 유체의 전이량의 변화가 적음을 확인하였다.

8. 정상상태에서 출구 nip 공동의 개수를 5개로 시뮬레이션을 진행하였으나 향후 공동의 개수변화와 생성과정을 계속 연구할 예정이다. 본 연구 결과들은 R2P 시스템의 유체 흐름의 해석으로 보다 정밀하고 균일한 제품이 요구되는 오프셋 시스템을 이용한 인쇄전자분야의 연구에 유용하게 사용될 것으로 사료된다.



참 고 문 헌

- 1) J. T. Youn, Y. T. Kim and S. M. Lim, Computer simulation for the cavitation changes at the exit of offset printing nip, Journal of Korea Tappi, Vol. 46, No. 3, pp. 1~10 (2014)
- 2) M. A. Johnson and D. W. Bousfield, Viscoelastic roll coating flow, Electronic Theses and Dissertations. Vol. 3, No. 2, p. 235 (2003)
- 3) J. H. De Grace and P. J. Mangin, A mechanistic approach to Ink transfer part II: The splitting behaviour of inks in printing nip, Advances in Printing Science and Technology, Vol. 19, pp. 146~161, Pentech press, London (1987)
- 4) P. Oittinen and U. Lindqvist, The behaviour of printing ink in an offset printing nip, Paperi ja Puu-Paper and Timber. Vol. 63, No. 6, 432, (1981)
- 5) S. N. Ercan and D. W. Bousfield, Influence of fluid rheology on filament size, TAPPI International, Printing and Graphic Arts Conference Proceedings, TAPPI Press, USA, pp. 121~132 (2000)
- 6) Y. H. Jeong, J. T. Youn and S. B. Kim, A study on the rheological analysis of tack values using alkyd vanish for

- printing ink, Journal of Korean Printing Society. Vol, 8, No. 1, pp. 1~20 (1990)
- 7) J. T. Youn, Study on the pressure distribution and ink splitting at the exit of printing nip, Journal of Korean Printing Society. Vol, 10, No. 1, pp. 55~67 (1992)
- 8) L. J. Davis, G. W. Poehlein, Theoretical analysis of film splitting, Taga proceedings. pp. 279~291 (1970)
- 9) J. S. Aspler, Y. H. Zang, L. Larrondo and L. Perron, Printing tack development and coated paper structure, Pulp and paper research institute of canada. pp. 162~177 (1997)
- 10) Y. Ciang, D. W. Bousfield, Influencel of coating structure on ink tack dynamics, Pulp and paper science. Vol, 26, pp. 221~227. (2000)
- 11) D. J. Guerrette, A Steady State Inking System Model for Prediction Ink Film Thickness Distribution, Taga Proceedings, pp. 227~235 (1970)
- 12) J. E. Jeong, On the three dimensional conductive ink patterning onto the paper based device(PFD) using by gravure printing method, Doctoral thesis, p. 7 (2018)

- 13) J. T. Youn, S. M. Lim and S. A. Choi, A Wiping Gravure Printing Method for Realizing a Trench Pattern in Printed Electronics, Journal of Imaging Science and Technology, Vol. 61, No. 3, pp.1~7 (2017)
- 14) S. H. Kang, Studies on maximum transfer rate of printing ink, Journal of Korean Printing Society. Vol. 13, No. 1, pp. 1~12 (1995)
- 15) I. Ichikawa, Science in Paper, Ink and Printing, Insatsukyoku Choyokai, p. 132 (1970)
- 16) J. E. Jeong, A study on the flow at the exit of printing nip, p. 4 (2012)
- 17) T. W. Bang, A Study of the properties of Paper for Optimizing Printability on the Printing Methods, doctoral thesis, pp. 3~7 (2014)
- 18) W. C. Walker and J. M. Fetsko, A concept of ink transfer during printing, AM. Ink Maker, Vol. 33, No. 12, p. 38 (1955)
- 19) J. T Youn, Introduction to printability, P. 249 (2010)

- 20) M. I. Kolte and P. Szabo, Capillary thinning of polymeric filaments, The Society of Rheology Inc, pp. 609~625 (1999)
- 21) A. S. Lee, A study on the computer simulation of ink flow in the reverse off-set printing, Journal of the Korean Graphic arts Communication Society, Vol. 30, No. 2, pp. 23~33 (2012)

