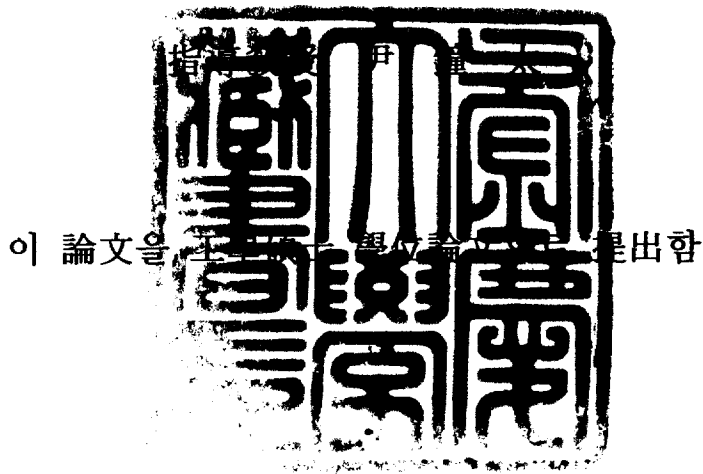


工學碩士 學位論文

인쇄롤러 틈새에서 잉크 전이의 시뮬레이션에 관한 연구



2006年 2月

釜慶大學校 大學院

印刷工學科

李 美 情

李美情의 工學碩士 學位論文을 認准함

2006 年 2 月 24 日

主 審 工學博士 具 哲 會



委 員 工學博士 南 壽 龍



委 員 工學博士 尹 鐘 太



목 차

목 차	i
List of figures	iii
List of tables	iv
Abstract	v
1. 서 론	1
2. 이 론	3
2-1. 전이방정식	3
2-1-1. 전이 정수	3
2-1-2. 자유 잉크(f)값의 계산	4
2-2. 잉크 전이 이론	6
2-2-1. 공동설(空洞說)	6
2-2-2. 점탄성설(粘彈性說)	7
2-3. 점탄성 모델	7
2-3-1. Maxwell 모델	8
2-3-2. Voigt 모델	8
2-3-3. 4요소 모델	10
2-4. 점탄성 잉크 모델	10
2-4-1. Generalized Newtonian	11
2-4-2. Differential Newtonian	11
2-5. 잉크 전이 변수	13
2-6. 작업 적성 및 점도	13

3. 시뮬레이션	16
4. 결과 및 고찰	19
4-1. 잉크의 거동 모습 및 압력 분포	19
4-1-1. 잉크의 전이 이론	19
4-1-2. 압력 분포	24
4-1-3. 속도 분포	25
4-2. 잉크 모델에 따른 비교	26
4-3. 잉크 전이점과 작업 변수	29
5. 결 론	32
참 고 문 헌	33

List of figures

Fig. 1. Ink transfer mechanism of solid printing	4
Fig. 2. Distribution of pressure and velocity on the roller nip	6
Fig. 3. Basic equations and models to solve the viscoelastic flow	7
Fig. 4. Model of four element models	10
Fig. 5. The relation of ink amount and filament length at 10cm/sec	15
Fig. 6. The relation of ink amount and filament length at 100cm/sec	15
Fig. 7. Description of the symmetric ink transfer	16
Fig. 8. Finite element mesh and boundary sets	18
Fig. 9. The thereotical ink transfer was proved(real model)	19
Fig. 10. The thereotical ink transfer was proved(experiment)	20
Fig. 11. The each ink transfer model according to the time intervals	21
Fig. 12. The two types ink according to the print time	22
Fig. 13. Ink transfer curve	23
Fig. 14. Splitting point from the nip center	23
Fig. 15. The pressure contour in the nip	24
Fig. 16. The pressure profile in the distance from nip	24
Fig. 17. The velocity contour in the distance from nip	25
Fig. 18. The velocity vector in the distance from nip	25
Fig. 19. The X, Y position on the free surfaces of each models	27
Fig. 20. The results of different models on the stream function	28
Fig. 21. The velocity according to two models	29
Fig. 22. Filament at rupture according to amount of ink flow	30
Fig. 23. Filament at rupture position on the velocity 20cm/sec	31
Fig. 24. Filament at rupture position on the velocity 100cm/sec	31

List of tables

Table 1. Relation of Variable Elements between Results of Test	12
Table 2. Composition and Rheological Properties of Model Liquids	13
Table 3. Physical Properties of the Ink Transfer Model	17
Table 4. The Parameters according to Ink Model	26

Simulation of Ink Transfer in the Nip of Printing Roller

Mi-Jung Lee

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

Abstract

In off-set printing or coating process, it transfers ink on plate by rolling system. As ink flows between rolls have an influence on printability of the final products, it needs to be studied scientifically and then control its values. Ink flows between rolls are processed under the effect of diversity factors such as rheological properties, printing speed, temperature, humidity etc. Therefore, this study try to approach the real ink transfer mechanism to be concerned about all sorts of variables.

It is based on the theory both immobilized ink and free ink by Walker-Fetsko. Polyflow software is used to demonstrate the theory and study the relationship of the substrate and ink transfer rate. Furthermore, the variable condition of the velocity, pressure, ink amount and viscosity are proved scientifically during the ink transfer.

The similar results of the real and theoretical model could found by using the Polyflow software. The results of simulation showed the relation of the immobilized and free ink. Especially, it is observed the point and shape of the free surface according to the non-Newtonian model.

Therefore, non-Newtonian ink transfer and the effect of variables are analysed by using the computer simulation.

1. 서 론

일반 오프셋(offset)이나 코팅(coating), 그리고 윤활 계통의 공업 분야에서는 롤러(roller)의 회전력에 의해 유체를 전이하는 것이 기본적인 메커니즘(mechanism)이다. 이러한 롤러 시스템(roller system)의 공업 분야는 다양한 변수 조건들이 존재하며, 그들의 상호 관계가 서로 복잡적으로 작용하기 때문에 과학적으로 규명하기가 어려운 실정이다.

롤러와 피인쇄체 사이에서 유체의 전이에 관한 연구는 지금까지 많은 연구자들에 의해 연구가 진행되어 왔다.^{1~3)} 그들은 롤러 틈새(nip)사이에 존재하는 압력 분포도와 틈새 출구에서 일어나는 잉크 분열(rupture)에 관해 공동(cavitation) 현상과 잉크 형성(filamentation), 그리고 롤러 사이의 힘에 의해 발생하는 뱅크(bank)부분에 관한 이론들을 제시하였다.

오늘날에는 기존의 개념들에 점탄성(viscoelastic)적인 효과, 속도와 온도 등의 환경 변수 및 두 롤러 사이의 잉크 자유 계면(free surface)형성 모습에 관한 연구로 발전해 왔다.

인쇄 기계에서 잉크 전이 원리는 롤러에 일정한 선속도 값이 주어지게 되면 잉크가 롤러를 타고 돌면서, 틈새에서 부압력(negative pressure)을 받게 되어 잉크가 늘어나고(elongation) 결국은 분열되고 갈라져서(splitting) 전이(transfer)가 일어난다. 특히 현재 인쇄 시스템에서 고속 인쇄의 경우에는 오렌지 필(orange peel)이나 날림(misting)^{4~5)} 등의 문제들이 발생할 수 있다. 틈새 출구에서 생성되는 잉크 필라멘트(filament)의 분기점(splitting point)의 위치와 잉크 필름 두께는 종이의 뜯김(picking)이나 린팅(linting)의 문제와 연관성이 있으며, 최종 인쇄물의 농도와 평활성에 큰 영향을 주게 된다.

인쇄 기계 상에서 잉크 전이에 영향을 주는 변수들은 크게 잉크, 롤러, 피인쇄체 그리고 작업 변수 등이 존재한다. Lawrence and Gary⁶⁾는 점도, 텍,^{7~8)} 잉크의 비중등 잉크의 물성에 따른 유체의 전이 현상을 연구했으며, Deborah⁹⁾는 롤러의 크기나 재질, 배치 방법 등의 기구학적인 면에 대한 연구를 하였다. 피인쇄체는 부착력, 젖음, 침투 속도 등에 직접적인 연관성이 있으며 압력과 속도, 온도와 습도 등의 작업 변수들 또한 영향을 주는 요소¹⁰⁾로 작용한다.

하지만, 현실적으로 롤러 틈새에서 잉크 분열은 매우 순간적이고, 단시간에

일어나는 현상으로 실험으로 관찰하기에는 많은 어려움이 있다. 특히 잉크 롤러에서 피인쇄체로의 전이현상은 잉크의 기본적인 레오로지^{11~13)} 뿐만 아니라, 다양한 환경변수의 영향을 받기 때문에 현실적으로 모든 조건들을 고려하여 실험을 하는 것이 매우 어려운 실정이다.

따라서 본 연구는 기본적인 잉크전이 메커니즘^{14~17)}을 과학적으로 규명하고자 컴퓨터 시뮬레이션 방법에 의해 인쇄 롤러 틈새에서 잉크의 거동을 모사하였다. 특히 많은 변수 조건들 중에서 잉크의 물성과 속도와 압력 등의 작업 조건들과 각 잉크의 레오로지적 특성에 맞는 모델에 따라 틈새의 출구 부분에 생성되는 잉크의 자유 계면을 해석하는데 그 목표를 두었다.^{18~22)}

또한 틈새 사이에서 잉크가 받는 스트레스(stress), 압력(pressure)과 점도(viscosity), 전단속도(shear rate)의 분포도 및 시간변수에 따른 결과들과 최종 잉크 전이점의 위치 변화를 예측하였다.

시뮬레이션 소프트웨어는 유한요소법(Finite Element Method)방식의 Polyflow(version 3. 10. 0)를 사용하였고 시간에 따른 잉크 전이 모양의 전체 변화 모습을 알아보기 위해 틈새의 입구에서 출구까지의 전체모양을 해석하였다. 그리고 실제 인쇄잉크가 롤러에서 전이될 때, 다양한 변수 값의 변화가 기본적인 압력분포 및 잉크의 전이점의 위치에 미치는 영향에 대해 고찰하였다.

2. 이 론

2-1. 전이방정식

인쇄적성을 과학적이고 공학적으로 연구하기 시작한 것은 1950년대부터이며 가장 먼저 해석하려고 했던 것은 잉크와 종이의 전이적성이다. 이 문제를 수학적으로 해석하기 위한 첫 단계는 인쇄판의 잉크의 양에 따른 인쇄물의 잉크량을 정량적으로 측정하는 것이다.

가장 먼저 제안된 Walker-Fetsko 전이 방정식은 다음과 같은 세 가지의 개념으로 인쇄 적성 계수들을 정의하였다.

(가정 1) 용지의 피복 면적 비 (k 값)

(가정 2) 고정 잉크의 개념 (b 값)

(가정 3) 자유 잉크의 분열 (f 값)

2-1-1. 전이 정수

Walker-Fetsko의 전이방정식에서 사용된 세 개의 정수인 k , b , f 를 잉크의 전이정수(transfer parameters)라고 하며, 가장 중요하게 생각되는 것은 f 값이다. 피인쇄체의 물성에 따라 결정되기 쉬운 k , b 값과는 달리 f 값은 롤러 틈새 사이에서 자유 잉크의 피막이 분열하여 종이에 전이되는 비율을 나타내므로 실제, 롤러와 롤러 또는 롤러와 피인쇄체 사이의 잉크들 중에서 어느 부분에서 분열이 되는지를 나타낸다.²³⁾

Fig. 1은 민짜 인쇄(solid printing)에서 잉크의 전이 메커니즘을 고려한 것으로서, 피인쇄체와 관련되는 k , b 의 전이 정수의 연관성은 배제하고 자유 잉크량만을 고려하였다. 이와 같이 전이 정수는 인쇄 재료와 인쇄 공정상 조건들에 따른 인쇄 잉크의 전이를 나타내는 변수이므로, 인쇄 공정의 상태를 표현하는 중요한 변수로 사용된다.

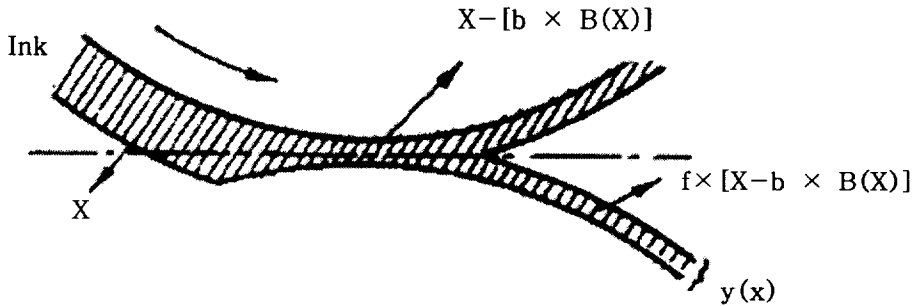


Fig. 1. Ink transfer mechanism of solid printing.

2-1-2. 자유 잉크(f)값의 계산

롤러 틈새 사이의 자유 잉크 값을 계산하기 위해서는 인쇄를 동역학적으로 해석해야 한다. 이론상 인쇄 기계 상의 인쇄 잉크는 레오로지적 물성 자체가 non-Newtonian이며 전이가 한번 씩 이루어질 때마다 받는 변형 속도(strain)나 스트레스가 다르다. 따라서 실제 인쇄 기계 상에서 빠른 인쇄 속도로 잉크의 피막이 분열 되는 과정을 연구하기 위해서는 한 번의 전이가 이루어지는 전체적인 시간 조건을 고려해 주어야 한다.

동역학적인 자유 잉크의 값은 빠른 인쇄 속도 안에서 거의 충격적인 스트레스를 받게 된다. 이 때 잉크 피막의 스트레인은 대단히 크며, 충격에 의한 충격파가 생기게 되고 충격파의 영향을 받는 잉크는 국부적으로 약점(weak point)이 있는 부분에서 분열이 일어나게 된다. 이 분열지점이 f 점이므로 전이정수를 이론적으로 계산할 수 있다. 이것을 동역학적으로 해석하는 방법이다.

롤러에 의해서 잉크가 받는 스트레스를 계산하기 위하여, 가장 간단한 원압식 인쇄기의 모형에서 해석한다. 판과 압통사이에 있는 잉크를 압통이 누르는 압력은 판의 위치에 따라서 변한다. 이렇게 변화되는 상황은 식 (1)로 표현된다.

$$\frac{dp}{dx} = \eta \frac{d^2 u}{dy^2} \dots\dots\dots (1)$$

이것을 y 방향에 대한 유명한 Navier-Stokes 식이라고 한다. 이것은 레오로지에서 스트레스에 대한 변형 속도의 일반식과 같다. y는 판의 수직 방향으로 위로 향한 거리(cm)이며, 이 거리는 실린더의 가장 가까운 곳에서 최저이고, 양쪽으로 멀어질수록 값이 커진다. 그리고 u는 롤러의 스트레스 때문에 생긴 한쪽 방향의 변형 즉, 흐름 속도(cm/sec)이며 η 는 잉크의 점도(poise)이다.

또 틈새 간격을 통과하는 잉크의 총 유량은 식 (2)와 같다.

$$Q = \int_0^h u dy \dots\dots\dots (2)$$

Q는 압통의 단위 길이 당 나가는 량(cm^3/sec)이고 h는 판에서 압통까지의 거리(cm)이다. 그런데 압통과 판의 간격은 거리에 따라서 변하므로 식 (3)과 같은 식에 의해 표현가능하다.

$$h = h_0 + \frac{x^2}{2R} \dots\dots\dots (3)$$

식 (3)에서는 판과 압통의 거리가 가장 가까운 간격(cm)이고 R은 압통의 반경이다. 식 (2)는 미분방정식이므로 적분하면 간격내부(nip width)의 임의의 위치에서 가속도, 속도, 압력구배(pressure gradient) 등을 계산할 수 있다.

$$\text{가속도 } \left(\frac{du}{dy}\right) = \frac{1}{2\eta} \cdot \frac{dp}{dx} (h - 2y) \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{속도 } (u) = \frac{1}{2\eta} \cdot \frac{dp}{dx} (hy - y^2) + u_0 \dots\dots\dots (5)$$

$$\text{압력구배 } \left(\frac{dp}{dx}\right) = 12\eta \left(\frac{U}{h^2} - \frac{Q}{h^3}\right) \dots\dots\dots (6)$$

2-2. 잉크 전이 이론

잉크가 분열될 때 생기는 현상인 택(tack)에 관한 이론들 중에 가장 널리 알려진 이론에는 공동설(空洞說)과 점탄성설(粘彈性說)을 들 수 있다.²⁴⁾

2-2-1. 공동설(空洞說)

롤러 사이 또는 두개의 평행판 사이에 있는 잉크가 각각 반대 방향으로 끌어당기는 힘에 의해 스트레스를 받는데, 이 스트레스가 커지면 잉크의 피막 내에 공동이 생기고 이 공동이 성장하여 분열된다는 이론이 공동설이다.

Fig. 2는 동일한 속도로 회전하는 롤러의 틈새 안에서 잉크의 압력과 속도의 분포도이다. 롤러가 회전하기 시작하면서 틈새 입구에서 급격히 압력이 증가하다가 최대점 A를 지나고 나면 틈새의 중심에서 급격히 감소한다.

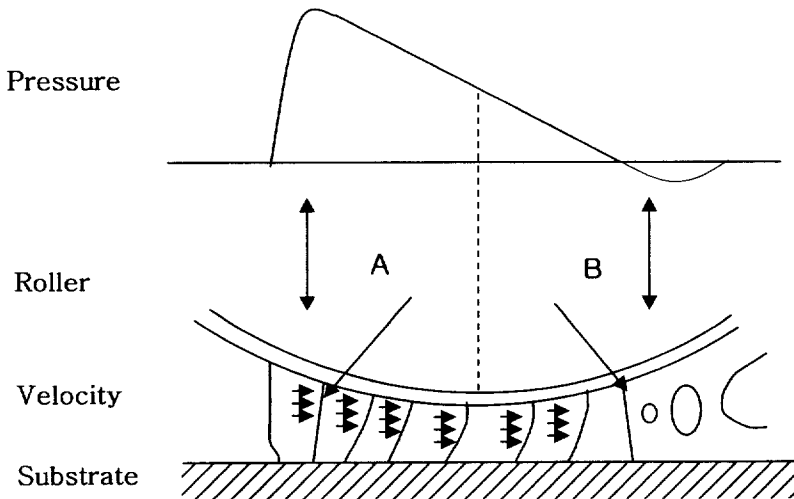


Fig. 2. Distribution of pressure and velocity on the roller nip.

압력이 대기압과 같게 되는 B 점에 이르면 잉크는 층류로 유동하며, 정압력이 걸리다가, 이 점을 지나면 부압력이 작용한다. 그리고 틈새의 출구를 통과한 잉크를 두 롤러가 상하로 끌어당기게 된다.

따라서, 압력이 최소로 걸리는 곳에서 잉크의 피막이 stress를 받으면, 저속에서는 접촉 중심을 향하여 아치상의 자유 계면이 생긴다. 그러나 고속에서는 stress를 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.

2-2-2. 점탄성설(粘彈性說)

잉크는 단시간 내에 일어나는 변형에 의해 점탄성적인 성질을 나타내는데 매 순간마다 스트레스를 받는 시간에 따라서 점성액체, 또는 탄성적 고체로 거동하고, 대부분 점탄성인 물질처럼 변형한다는 이론이다. 이 이론은 빠른 속도에서는 스프링이 작용하고, 늦은 속도에서는 대취포트가 작용하는 원리와 같은 것이다. 이와 같이 잉크를 점탄성적인 액체로 취급하여 다루는 것이 점탄성설이다.

2-3. 점탄성 모델

Fig. 3은 점탄성 유체를 수학적으로 해석하기 위해서는 가장 기본이 되는 방정식은 Maxwell 모델과 Voigt 모델을 나타낸다.

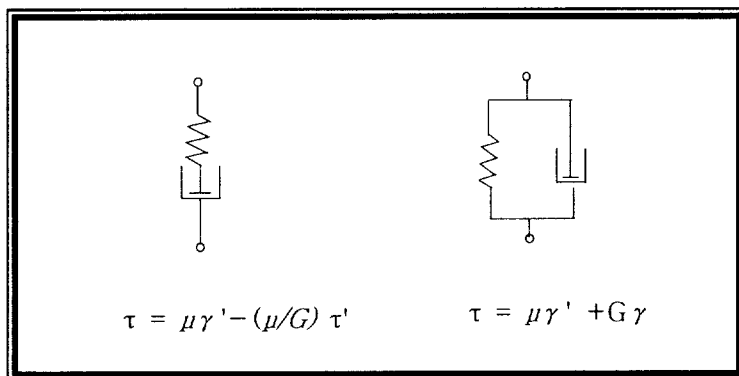


Fig. 3. Basic equations and models to solve the viscoelastic flow.

이 두 모델들은 점탄성을 수학적으로 해석하는 방법에 따라 나뉘어지며, 어느 것을 기본 방정식으로 하느냐에 따라서 같은 유체라도 값으로 해석된다. 기본적인 Maxwell 모델은 물엿이나 꿀과 같이 일정한 외력에 대해 일정 속도의 유동이 계속되는 상태이며, Voigt 모델은 폴리에틸렌 필름과 같이 일정한 외력에 대해 점차 변형속도가 정지하여 평형 점에 도달하는 것이 특징이다.

2-3-1. Maxwell 모델

Maxwell은 총 변형 속도 $\dot{\gamma}$ 를 탄성에 의한 변형과 흐름 변형의 합이라는 가정 하에서 유도하였다. 즉, 두 값을 더하면 식 (7)과 같다.

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_f + \dot{\gamma}_e \quad \text{..... (7)}$$

식 (7)에서 $\dot{\gamma}_f$ 는 점성변형이며, $\dot{\gamma}_e$ 는 탄성변형이다. 시간에 대해 미분하고, 미분한 값을 '로 표시하면 식 (8)과 같다.

$$\dot{\gamma}' = \dot{\gamma}_f' + \dot{\gamma}_e' \quad \text{..... (8)}$$

따라서, 이 식을 점성과 탄성의 식에 대입하면 식 (9)와 같다.

$$\dot{\gamma} = (\tau / \eta) + (\tau' / G) \quad \text{..... (9)}$$

τ' 는 $d\tau/dt$ 이므로 바꾸어 쓰면 식 (10)과 같다.

$$\tau = (\eta \dot{\gamma}) - (\eta / G) \tau' \quad \text{..... (10)}$$

2-3-2. Voigt 모델

Voigt solid의 레오로지 방정식은 역시 비슷한 방법으로 변형이 γ 만큼 일어날 때 총 스트레스는 점성으로부터 야기되는 스트레스 τ_f 와 탄성으로부터 야

기되는 스트레스 τ_e 의 합 이라는 가정 하에서 유도된다. 그러므로

$$\tau = \tau_f + \tau_e \quad \dots\dots\dots (11)$$

이고, 식 (11)에 점성과 탄성의 식에 대입하면 Voigt solid는 Newtonian 값과 Hookean의 값의 합과 같다.

$$\tau = \eta \dot{\gamma} + G\gamma \quad \dots\dots\dots (12)$$

식 (11) 에서 Bingham Plastic 의 경우를 볼 수 있는데, 이 흐름은 어떤 항복 응력(yield stress) 이내에서는 완전 탄성체로 작용하고, 그 범위를 넘어서면 완전 점성 체로 작용하는 행태를 보인다. 항복 응력을 S_o 라고 하면, 그 조건은 다음과 같다.

$$\dot{\gamma} = 0 \quad |\tau| < S_o \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$\tau \pm \tau_o = \mu \dot{\gamma} \quad |\tau| > S_o \quad \dots\dots\dots (14)$$

식(13)에서 μ 는 특별히 소성점도(plastic viscosity) 라고 부른다.

식(14)는 τ 가 일정하다는 가정 하에 미분방정식으로 풀면, 5단계의 응답을 각각 생각할 수 있으나, 가장 특징이 있는 2단계를 생각하면 다음과 같다.

$$\dot{\gamma} = S/G [1 - e^{-G\Delta t/\eta}] \quad \dots\dots\dots (15)$$

Voigt solid에 일정한 힘을 가하면 스프링은 순간적으로 늘어나게 되지만 병렬로 존재하는 피스톤의 영향을 받아서 서서히 탄성 평형 점에 도달하게 되고, 하중을 제거하여 stress를 받지 않으면 서서히 변형을 제로의 위치로 돌아온다.

2-3-3. 4요소 모델

점성, 탄성, 그리고 Maxwell과 Voigt 모델의 4가지 기본형만으로는 인체의 레오로지를 설명할 수 없다. 그러므로 Fig. 4와 같이 4가지 모델들을 연구하고 수식적으로 해석한다. 그 중의 하나가 4 요소 모델(four element mode)이다. 이 모델은 Maxwell의 요소와 Voigt요소를 직렬로 조합한 것이다. 이 경우 일정한 응력 S 에 대한 응력(creep)특성을 보면, 순간 탄성에 의해서 Voigt 요소들이 응력을 일으키지만 동시에 점성 요소가 작용하기 때문에 정지할 수가 없다. 장시간 동안에는 변형이 유동 현상으로 되어 경사가 심해지는데, $0-t$ 까지 관측된 사항은 Voigt형의 응력과 Newton 유동이 중첩한 모양이 된다.

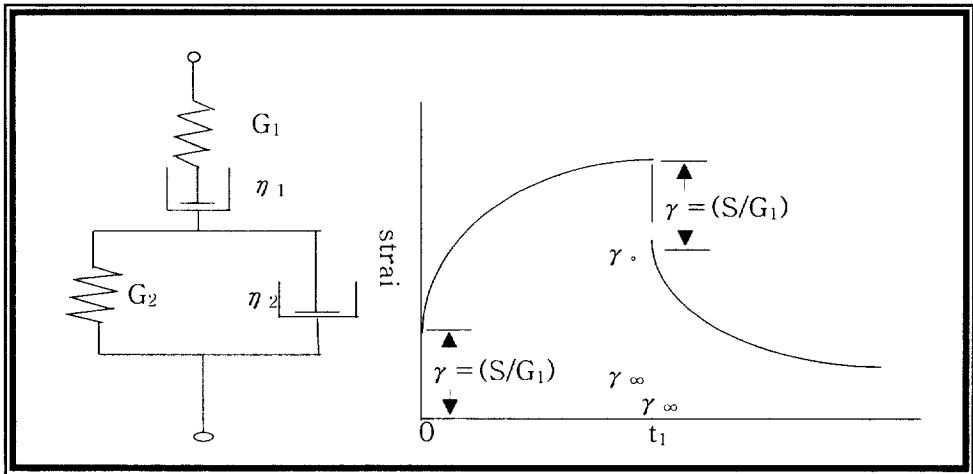


Fig. 4. Model of four element models.

2-4. 점탄성 잉크 모델

본 연구에서는 전산유체해석프로그램(CFD) 방법 중의 하나로서 시뮬레이션 소프트웨어인 polyflow 3.10.0을 사용하였다. Polyflow는 점성 및 점탄성이 영향을 미치는 복잡한 유체의 유동을 해석하는데 아주 우수하며, Newtonian과 non-Newtonian의 두 방식으로 해석이 가능하다.

Polyflow의 데이터는 일정점도 조건에서 발전된 Generalized Newtonian model

과 Maxwell방정식에 기반을 둔 differential Newtonian Model로 해석이 가능하다.

2-4-1. Generalized Newtonian

Generalized Newtonian은 Newtonian 과 탄성가가 없는 non-Newtonian의 모델 해석에 적합하다. 변수 조건은 일정 점도를 주는 Newtonian과 전단 속도나 온도에 따른 점도의 변화를 non-Newtonian으로 해석한다.

기본적인 방정식은 η_0 에서 Newtonian 점도이거나 전단 점도가 0일 경우의 일정 점도 값에서 여러 가지 모델로 발전되어 왔다.

$$\text{Constant law} \quad \eta = \eta_0 \dots\dots\dots (16)$$

$$\text{Power law} \quad \eta = K(\dot{\gamma})^{n-1} \dots\dots\dots (17)$$

K는 일정 상수이고 λ 는 지연시간이다. 그리고 n은 주어진 물질의 특성을 나타내는 지수값이다. Power law는 일반적으로 전단속도가 큰 고분자 물질의 점성을 해석하는데 사용된다.

2-4-2. Differential Newtonian

Differential Newtonian 모델은 전단속도와 온도에 따른 점도 변화뿐만 아니라 수직으로 작용하는 스트레스와 완화시간과에 따른 값들도 해석이 가능하다. 따라서 수직으로 스트레스를 받거나 늘어나는 고신장(high extentional)점도에 적합하다. 근본적으로 Maxwell 방정식을 모델을 하여 발전된 형태이다.

Oldroyd-B 모델은 가장 간단한 점탄성 방정식중의 하나로 Maxwell 모델에서 발전되었다. 이것은 스트레스에 대한 순수 점도 값을 고려하므로 더 정확하게 유동을 해석할 수 있다. 현재 각광받고 있는 모델중의 하나가 Gieskus 모델이다. 이것은 전단과 신장의 물성을 각각 해석하는데 전단에 대한 점도, 완화시간 등을 고려하고 신장에 대한 점도, 완화시간을 각각 고려하는 방식을 가지고 있다. 따라서 shear-thinning 용액과 마찬가지로 이상적인 탄성 유동을 하는 유체 해석에 적합하며 정상(steady)상태와 비정상(transient)상태를 동시에 해석할 수

있는 장점이 있다.

이 세 가지 모델은 스트레스 텐서인 용액(solvent)과 고분자 분자(polymer molecules)의 합으로 나타낸다.

$$\tau = \tau_s + \tau_p \quad \dots\dots\dots (18)$$

용액은 Newtonian 점도 η_s 로 생각할 수 있으므로 식 (19)로 주어지면, D 는 변형율의 텐서이다. 따라서 식 (20)이 유추된다.

$$\tau_s = 2\eta_s D \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$D = \frac{1}{2} (\nabla v + \nabla v^t) \quad \dots\dots\dots (20)$$

dv_j/dv_i 의 요소와 ∇v 의 대수인 ∇v^t 의 요소를 함께 고려한 ∇v 는 속도 구배를 나타낸다. 고분자 유체의 스트레스는 다른 모델들의 합으로 주어진다.

$$\tau_p = \sum_{k=1}^n \tau_k \quad \dots\dots\dots (21)$$

완화시간은 다양한 유동에서 각 모드(mode)에 따라 유연한 고분자의 물성을 특징짓는 요소이다. 이와 같은 연속체(constitutive) 방정식을 기본으로 하여 고분자는 완화 시간 모드에 상응하는 스트레스가 분포되어 있으며 이 변수들에 따라 모델들을 식 (22)와 식 (23)에서와 같이 제시하였다.

$$\text{Oldroyd-B} \quad \tau_k + \lambda_k \tau_{k(1)} = 2\eta_k D \quad \dots\dots\dots (22)$$

$$\text{Giesekus} \quad \tau_k + \lambda_k \tau_{k(1)} + a_k \frac{\lambda_k}{\eta_k} \tau_k \tau_k = 2\eta_k D \quad \dots\dots\dots (23)$$

2-5. 잉크 전이 변수

롤러 상에서 전이량에 영향을 주는 요소들은 매우 다양하고 복잡적으로 작용한다. 따라서 기본적인 모델을 모사하여 조건을 설정하기 위해서 다양한 변수들과 잉크 전이의 상관관계에 대해 연구하였다. Table 1은 롤러 상에서 잉크 전이에 영향을 주는 다양한 변수들의 관계를 나타내었다. 잉크 전이는 롤러의 압력과 속도, 잉크량과는 비례하고 점도에는 반비례하는 특성을 가지고 있다.

Table 1. Relation of Variable Elements between Results of Test

Results Variables	Relationship with amount of ink transfer
Printing pressure	proportion
Ink amount	proportion
Printing speed	inverse proportion
Ink viscosity	inverse proportion

2-6. 작업 적성 및 점도

Grace²⁵⁾는 잉크 분열과 관련된 속도, 잉크량, 점도 등의 변수 값의 변화에 대해 연구하였다. 잉크의 조성 물질 중의 하나인 carbon black는 shear thinning 현상을 나타내므로 이것의 조성을 달리 하여 모델을 제조하였다.

그리고 레오로지에 따른 모델들의 물성 값들을 파악하여 전단 속도100 m/sec에서 변화하는 자유계면과 점도와와의 관계를 해석하였다. 그의 실험을 통해 잉크 전이율에 변수 값으로 작용하는 잉크량과 속도에 따른 상관관계를 알 수 있다. Table 2는 실험에 사용된 모델들의 조성과 레오로지적 물성들이다.

Table 2. Composition and Rheological Properties of Model Liquids

Properties Liquids	Shear viscosity (Poise)	Specific gravity (g/cm ³)	Carbon black (%)
LV-0	0.17	-	0
LV-8	1.70	0.96	8
LV-12	6.00	0.98	12
HV-0	0.75	-	0
HV-8	3.00	0.98	8
HV-12	10.00	1.00	12
S0-0	1.35	-	0
SOR-0	7.30	0.95	0
SOP-20	6.70	1.02	20

Grace는 각 모델의 물성 조건에 따라 실험을 통해 속도와 잉크량에 변화에 따른 전이율과의 상관관계를 나타내었다.

Fig. 5는 속도가 10 cm/sec 인 저속에서 전체적인 경향은 잉크량과 점도가 잉크 전이율에 비례하는 경향을 보여주고 있다. 하지만 저점도에서는 저속의 경우는 분열점이 존재하지 않는 것으로 나타났다. 이 결과를 통해서 잉크량은 잉크 전이율에 비례하고, 저속일 경우 저점도인 유체는 흘러내림(drainage)현상이 발생할 수 있기 때문에 점도의 영향을 고려하여야 한다.

Fig. 6은 100 cm/sec 고속에서 잉크량과 점도에 관한 영향을 연구한 결과이다. 고속에서도 저속과 마찬가지로 잉크량과 점도는 전이율의 전체적인 경향을 비례하는 것을 알 수 있다. 특히 고속에서는 저속에서 관찰되지 않았던 저점도의 분열 지점을 확인할 수 있었고, 전체적으로 잉크량에 따라 전이율이 일정한 수준에 머물지 않고, 지속적인 증가 추세를 보이는 것이 특징이다.

J. H. De Grace의 실험을 통해 동일한 점도 조건임에도 불구하고 전이율이 다른것은 각 잉크의 구성에 따른 레오로지적 물성 차이가 미치는 영향이 크기 때문이며, 차후 적합한 잉크 모델 선정이 필요한 이유를 설명해 주고 있다.

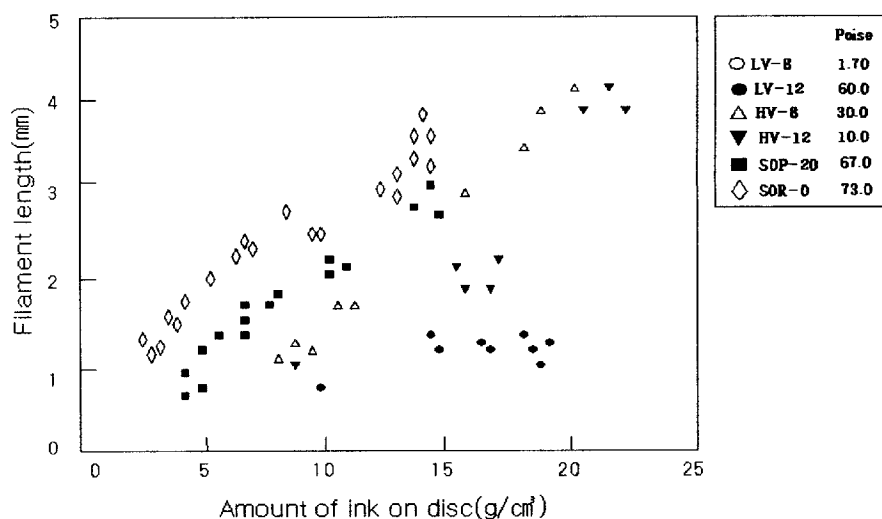


Fig. 5. The relationship of ink amount and filament length at 10 cm/sec.

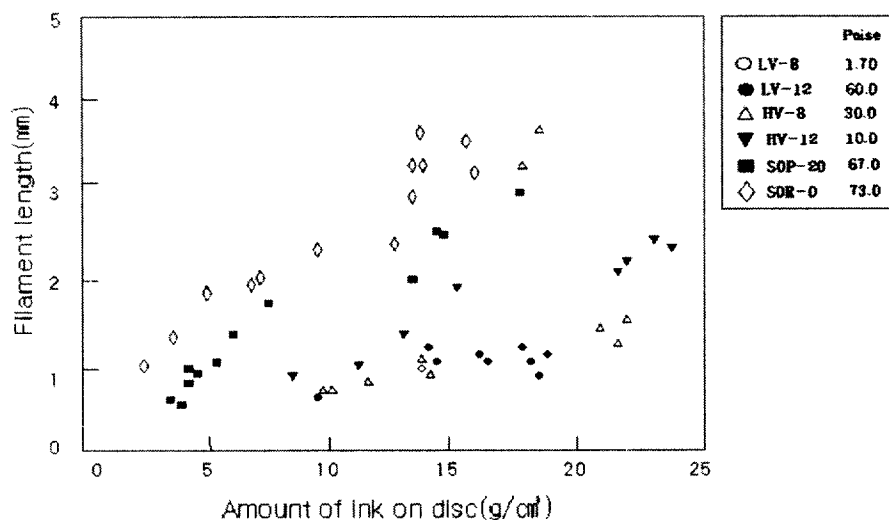


Fig. 6. The relationship of ink amount and filament length at 100 cm/sec.

3. 시뮬레이션

틈새 사이에서 잉크 거동은 대칭형이므로 2차원적인(plane method) 방법에서도 충분히 잉크 전이점 및 유동을 볼 수 있으므로, CPU 시간을 절약하고 간단화하기 위하여 2-D(two dimension) 방법을 선택하였다. Fig. 7은 직경이 40 cm 인 상부 롤러와 하부 롤러 틈새에서 잉크가 $Q(\text{cm}^3/\text{s})$ 로 왼쪽에서 공급되어 롤러의 선속도값(V_n)에 의해 오른쪽으로 전이되는 기본적인 개략도이다. 상부롤러와 하부롤러의 물성 조건이 동일하며 밀도(density)나 관성(inertia)의 영향은 받지 않는다고 가정하여 대칭적인 형태에서 중간부분을 잘라 윗부분을 도메인(domain)화하여 시뮬레이션 하였다.

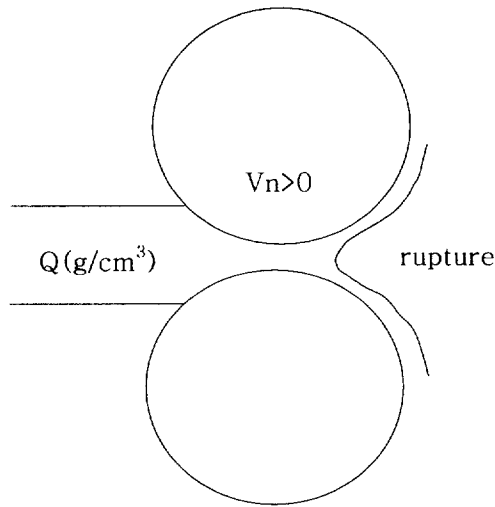


Fig. 7. Description of the symmetric ink transfer.

Table 3은 모사할 잉크 전이 모델의 기본 설정 값들을 나타내며, 속도(roll speed)나 잉크량(flow rate) 등은 인쇄적성시험기 IGT C1 매뉴얼의 값을 참고하여 결정하였다. 잉크가 점탄성유동을 할 것이라 가정하고 non-Newtonian 유동을 선택하였다. 또한 기본적인 물성이 고점도이며, 롤러의 접촉부 사이에 작용하는 전단속도가 큰 값을 고려해 Power law 모델을 적용시켜 계산하였다.

Table 3. Physical Properties of the Ink Transfer Model

Parameters \ Condition	Condition of Power law model
Viscosity- μ	100 poise
Surface tension- σ	20 dyne/cm
Gap width- h_g	0.2 cm
Flow rate-Q	0.6 cm/s ³
Roll speed-Vn	30 cm/s
Elements	105
Exponent-n	0.95
Natural time- λ	0.824 s

점도는 기준은 윤전 잉크의 점도는 10~100 poise 이고 활판 잉크의 점도는 100~500 poise 이라는 기본 점도 기준 값을 바탕으로 100 poise를 선택하였다. 틈새 출구에서 변화하는 자유계면은 롤러를 타고 도는 잉크와 피인쇄체 면을 따라 변화하는 잉크로 연구하기 위해 기본적으로 변화하는 모습에 안정성을 부여하였다. 따라서 표면장력(20 dyne/cm)값과 X, Y 축 방향에 따라 최대한 변화할 수 있는 범위를 설정하였다. 그리고 롤러와 피인쇄체와 만나는 교차점에는 변형에 따른 한계 접촉각을 두어 아치상의 자유 계면이 변화할 수 있는 범위를 제한하였다.

Fig. 8은 상위 부분만을 고려한 도메인의 초기 모델이며, Gambit 3.10.0을 이용하여 기본 도메인 작도를 하였다. 각각의 Boundary condition(BC)의 조건을 주었다.

각 순간의 잉크의 거동을 알아보기 위해 전체적인 작업은 시간 변수에 따라 달라지는 비정상상태(unsteady state)로 계산하고자 하였다. 따라서 time-dependent problem을 선택하였다. 이 때 온도 변화는 일정하다고 가정하여 단열(isothermal) 조건과 전단 속도에 따른 점도의 변화 양상을 알아보기 위해 점탄성 모델 중

Generalized Newtonian isothermal flow를 부작업으로 설정하였다. 기본적인 잉크의 물성 값은 점도 100 poise, relaxation time(0.824 s) 지수 $n(0.95)$ 값을 주어 초기시간 0에서 최종시간 1에 이르기까지의 잉크 거동을 모습을 모사하였다.

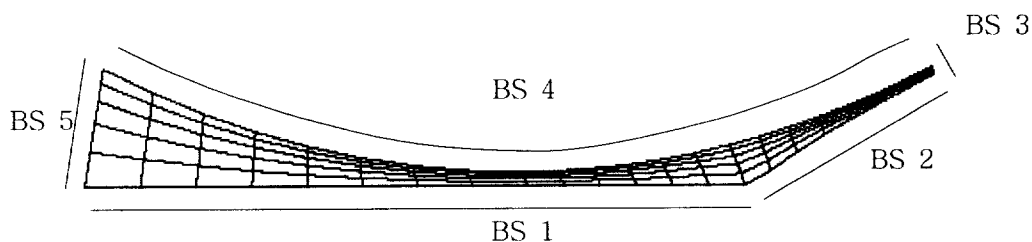


Fig. 8. Finite element mesh and boundary sets.

BS 1: Plane of symmetry

BS 2: Free surface (표면장력 20 dyne/cm)

BS 3: $(F_n, F_s)=(0,0)$ dynes

BS 4: $(V_n, V_s)=(-30, 0)$ cm/sec²

BS 5: inflow= (0.6) cm/s³ (automatic mode)

4. 결과 및 고찰

4-1. 잉크의 거동 모습 및 압력 분포

4-1-1. 잉크의 전이 이론

Walker-Fetsko는 잉크의 전이 정수 k , b , f 값과 전이 이론 모델을 제안하였다. 본 연구에서는 그들의 전이 모델 이론을 과학적으로 규명하고 세 가지의 잉크 전이 정수의 영향을 알아보기 위해 시뮬레이션 하였다.

Fig. 9는 Walker-Fetsko가 제안한 잉크의 전이 이론을 묘사한 것으로서, 두 롤러의 물성은 동일하며 잉크가 이상적인 분열, 즉 1:1의 양으로 전이가 되는 모습을 보여준다.

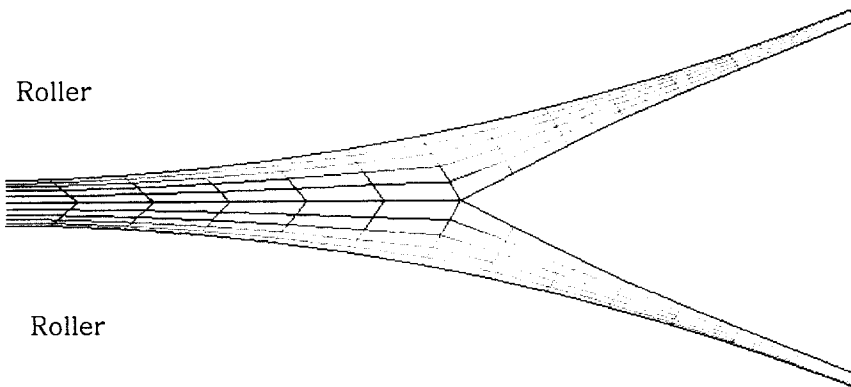


Fig. 9. The theoretical ink transfer was proved(real model).

이것은 이상적인 분열 모습이기 때문에 롤러를 타고 도는 자유 잉크인 f 값과 피인쇄체와 관련된 k , b 값은 동일한 비가 됨을 알 수 있다. 즉, 피인쇄체의 잉크 전이율과 롤러의 잉크 전이율이 1:1의 상관관계를 가지며, 인쇄 도중에는 잉크와 관련된 문제점이 없다는 것을 의미한다. Fig. 9는 이상적인 전이 모델에 롤러의 속도나 잉크의 량과 점도 등과 같은 변수를 두었을 때 그 결과를 나타

낸 것이며, 잉크의 유동을 흐름에 따라 본 것이다. 이것을 통해서 롤러의 선속도 값이 주어지게 되면 피인쇄체의 잉크 전이량이 증가하고 롤러를 타고 도는 자유 잉크량이 감소한다는 것을 알 수 있다.

즉, 공급된 잉크량이 일정할 때 피인쇄체로의 잉크 전이량이 증가하면 롤러를 타고 도는 잉크의 전이량은 감소한다는 것을 유추할 수 있다.

또한 Fig. 10의 경우 잉크의 흐름 속도가 분포하지 않는 점을 잉크의 분기점이라 가정한다면 마지막 잉크의 분열 형태가 불균일한 것으로 보아 미스팅이나 날림 등의 잉크와 관련된 인쇄 문제의 발생 원인이 될 수 있음을 유추하였다.

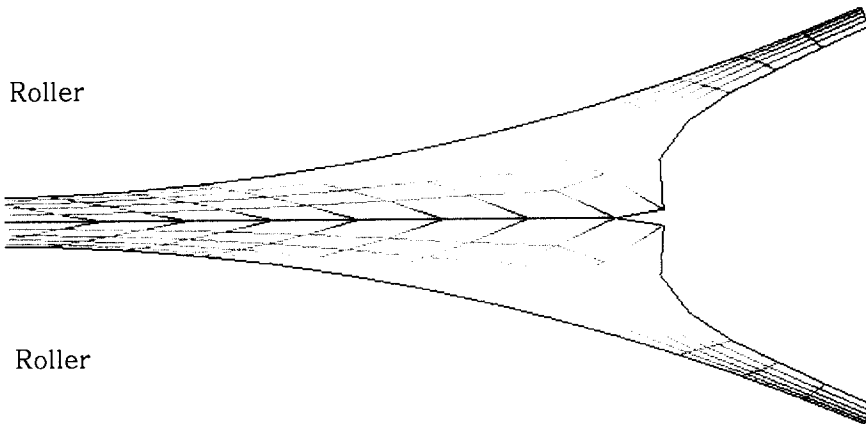
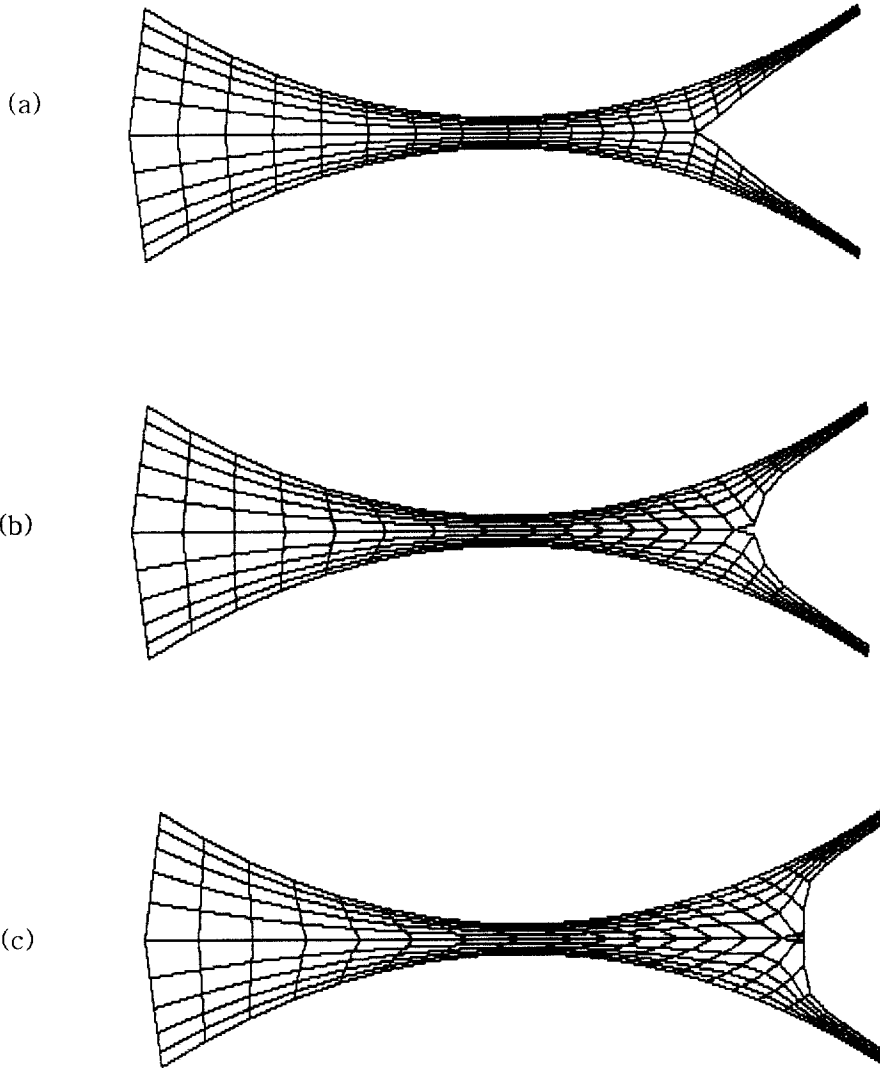


Fig. 10. The theoretical ink transfer was proved(experiment).

다음 Fig. 11은 처음 시간 0에서 최종 시간 1까지의 잉크의 거동 모습을 일정한 시간 간격을 두어 모사한 결과이다. mesh의 모양 변화에 의해 틈새의 출구에서 잉크의 분열 양상과 잉크 전이율에 관한 실험적인 결과와 비교가 가능하였다.

Fig 12는 Coco와 Cockerline²⁶⁾의 Prufbau test기를 이용하여 피인쇄체로 전이되는 잉크 즉, 고정화 잉크량의 시간에 따른 전이율을 연구하였다. 그들의 연구 결과에 통해 고정화 잉크량의 경우 단시간 내에 전이가 되는 양이 많으며, 전이 시간 또한 상당히 짧은 것을 알 수 있다.



**Fig. 11. The each ink transfer model according to the time intervals.
((a) 0 sec, (b) 0.50 sec, (c) 1.00 sec)**

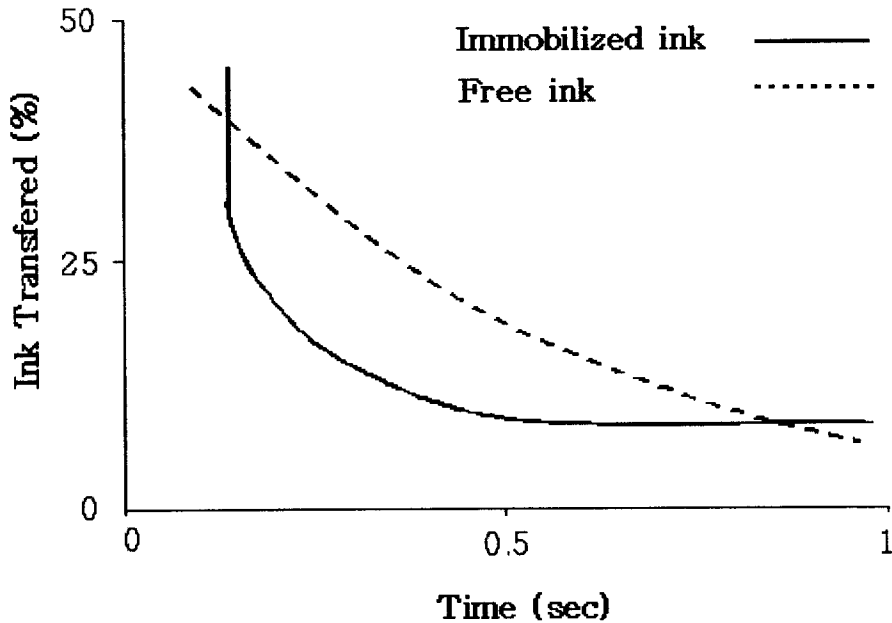


Fig. 12. The two types ink according to the print time.

즉, 피인쇄체로 들어가는 잉크는 인쇄 시작과 동시에 부착하는 피인쇄체의 순간적으로 전이되는 것을 알 수 있고 또한 이 결과를 바탕으로 고정화 잉크의 전이율은 잉크나 작업 변수의 영향보다는 피인쇄체의 물성에 가장 큰 영향을 받을 것이라 사료된다. 이 연구 결과를 바탕으로 시뮬레이션을 통해 고정화 잉크뿐 아니라 롤러를 타고 도는 잉크, 즉 자유 잉크량의 거동에 대한 연구가 가능하였다. 자유 잉크는 고정화 잉크처럼 단시간내에 전이량이 가장 크지만, 시간에 따른 반비례적인 곡선으로 롤러를 통해 전이되는 것으로 보아 시간의 함수인 롤러의 속도 값의 영향이 클 것이라 사료된다.

잉크의 전이율 곡선은 잉크량과 전이율이 서로 비례관계에 있다는 것에서 출발한다. Fig. 13은 일반적인 잉크 전이율 곡선을 나타내며 Fig. 14는 시뮬레이션을 통해 시간에 따른 잉크 분열점을 프로파일화한 것이다. 이 두 그래프 모두 잉크 전이의 전반적인 양상이 비슷함을 보여주고 있다.

즉, 잉크의 전이는 틈새의 중앙과 가까울수록, 시간이 짧을수록, 잉크량이 많을수록 급격히 증가하다가 전이 시간이 길어지면서 외부와 닿는 자유 잉크량이 많아질수록 더 이상 증가하지 않고 일정한 선을 유지한다.

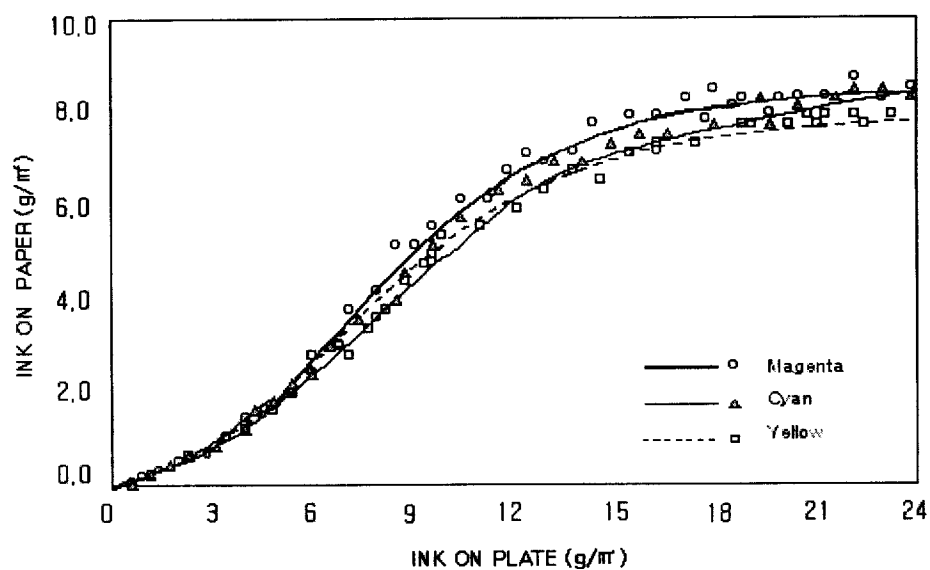


Fig. 13. Ink transfer curve.

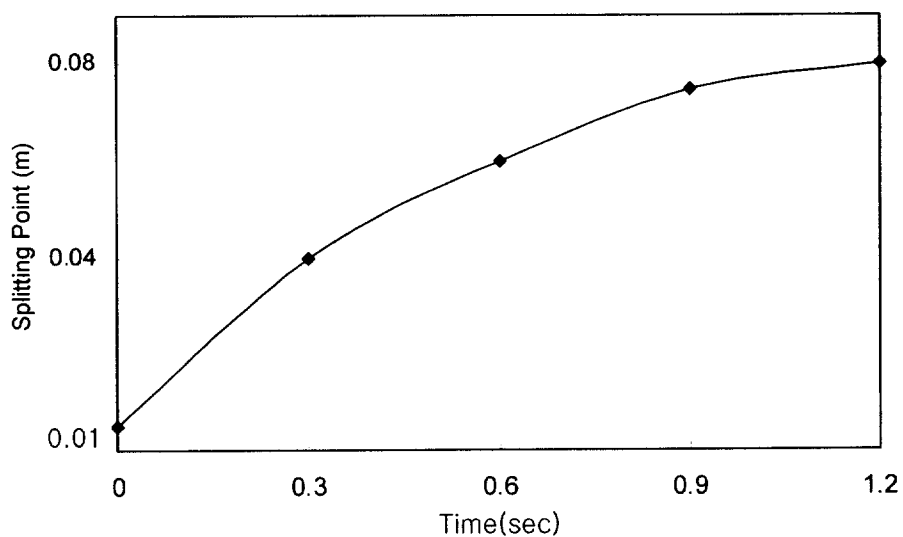


Fig. 14. Splitting point from the nip center.

4-1-2. 압력 분포

틈새 사이의 압력 분포도는 틈새 중앙에서 급격히 감소하는 압력이 출구에서는 부압력값으로 작용하면서, 인쇄 도중 미스팅과 같은 많은 인쇄 문제와 관련이 있음을 알 수 있다.

다음 Fig. 15는 모사한 잉크 전이 모델의 압력을 등고선(contour)으로 나타내었고 Fig. 16은 그래프로 나타내었다. 압력의 분포도는 이론과 모사된 전이 모델에서 일치함을 확인할 수 있었고, 실제 롤러에 선속도 값이 주어진 후 잉크의 전이가 일어날 때 틈새의 중앙에서 급격하게 압력이 떨어지고, 틈새의 출구에 부압력값이 걸리는 지점에서 잉크의 분열이 일어난다고 유추할 수 있었다.

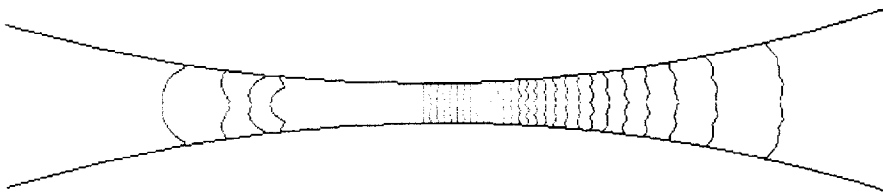


Fig. 15. The pressure contour in the nip.

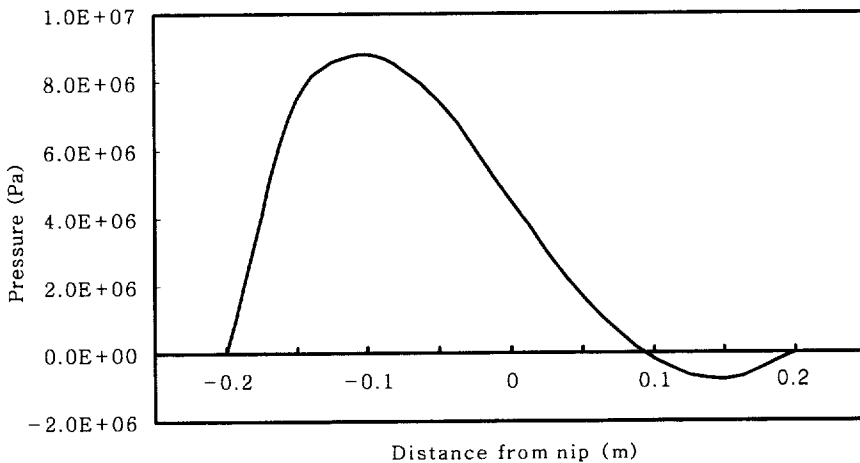


Fig. 16. The pressure profile in the distance from nip.

4-1-3. 속도 분포

Power law 모델의 속도분포도는 다양하게 표현할 수가 있다. 다음 Fig. 17은 동일한 속도 값의 분포를 알 수 있는 등고선 형태이며, Fig. 18은 각 위치 당 속도를 벡터로 나타내어 크기와 방향성을 나타내었다. 롤러 틈새의 중앙에서 가장 높은 속도 값이 분포하며, 이것은 가장 좁은 틈새 사이에 다량의 잉크의 흘러들어가면서 가장 많은 전단 변형율을 받기 때문이라 유추할 수 있다. 전단 속도에 영향을 받아 점도의 변화가 많을 것이라 추측할 수 있다. 그리고 틈새의 출구에서 속도 값이 더 이상 분포하지 않는 지점인 잉크의 분열점의 위치를 알 수 있었다.

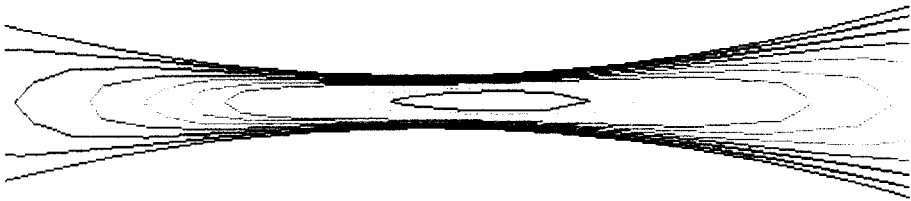


Fig. 17. The velocity contour in the distance from nip.

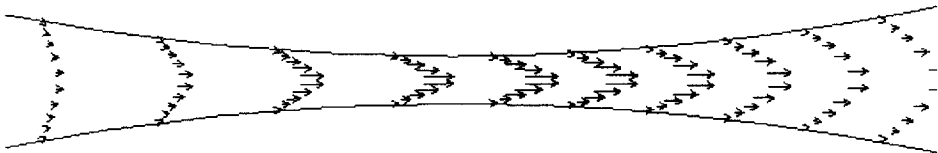


Fig. 18. The velocity vector in the distance from nip.

4-2. 잉크 모델에 따른 비교

잉크의 레오로지적 물성이 압력, 속도, 전이점에 미치는 영향을 알아보기 위해 다음과 같은 각 모델의 잉크를 선택하여 시뮬레이션 하였다.

Table 3은 선택한 모델들의 조건들로 전체적인 작업 조건은 모두 동일하게 두었고 뉴우톤 모델은 constant viscosity 값을 주고 non-Newtonian 모델들은 전단 속도에 따라 점도가 변화를 변수화 하였다. 따라서 각각의 모델에 따른 속도 분포와 자유 계면의 위치를 비교하였다.

Table 4. The Parameters according to Ink Model

Model Parameter	Oldrody-B	Gieskus	Newtonian
Viscosity- μ (poise)	1000	1000	1000
surface tension- σ (dyne/cm)	20	20	20
Exponent-n	0.824	0.824	-
Natural time- λ (s)	2.9	2.9	-

Fig. 19는 각 모델들의 마지막 유동 모습을 mesh화하여 틸드 출구에서 발생하는 잉크 분기점의 양상 및 위치를 보여준다. 이 결과를 통하여 최종 잉크 분기점의 모양 및 전이점의 위치가 뉴우톤과 비 뉴우톤에 따라 크게 차이가 남을 알 수 있다. Newtonian과 Oldrody-B 모델은 비슷한 자유 계면의 모습을 가진다. 크게 차이가 나는 Gieskus 모델의 경우는 현재 구동 프로그램에서 Maxwell 방정식을 기본으로 하여 해석한 점이 다른 모델과 차이가 있기에 나타나는 결과라고 생각된다.

자유 계면의 모양만을 비교해 보면 특히 Power law 모델에서 가장 clean한 인쇄가 될 것이라고 생각되며, 자유 계면의 성장이 다소 불안정한 Newtonian과 Oldrody-B 모델에서는 미스팅과 같은 인쇄 불량 문제가 발생하리라 사료된다.

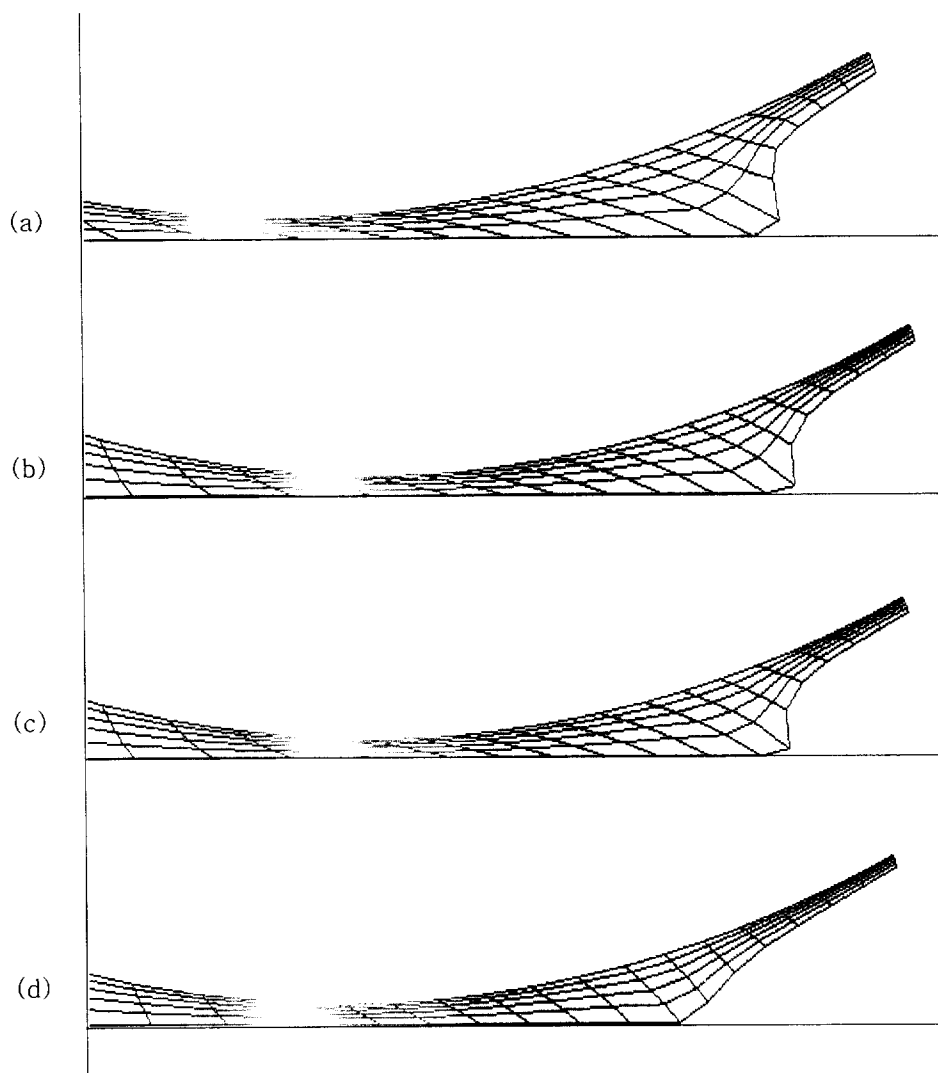
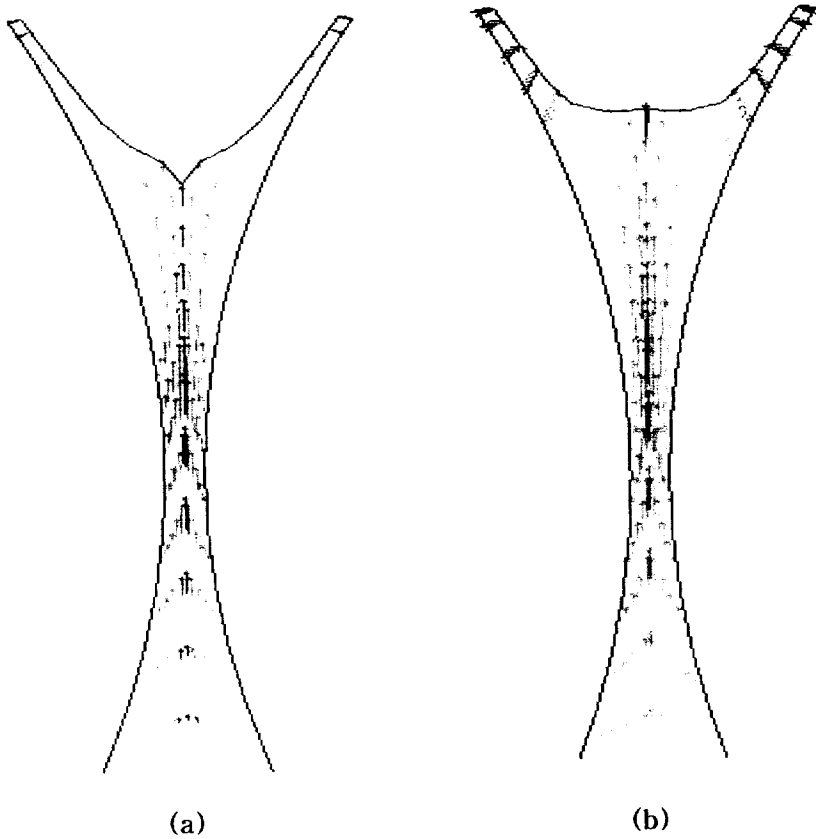


Fig. 19. The X, Y position on the free surfaces of each models.
((a) Newtonian model, (b) Power law model,
(c) Oldroyd-B model, (d) Gieskus model)

다음 Fig. 20은 non-newtonian모델을 달리했을 때, 잉크전이모델에서 속도 변화를 살펴본 것이다. 틸새의 입구와 출구에서는 잉크 속도가 낮았으나, 틸새 중앙에서 최고의 속도값을 나타냈었다.



**Fig. 20. The results of different models on the stream function.
((a) Gieskus model, (b) Power law model)**

Fig. 21은 위의 두 모델의 틸새의 거리에 따라 속도 분포도의 변화를 그래프로 비교한 것이다. 롤러 틸새의 중앙에서 다량의 잉크가 흘러가면서 속도가 최고점에 도달하는 것을 확인하였다. 또한 모델에 따라 동일한 위치에서 가지는 속도의 값이 다르다는 것을 알 수 있었으며, 속도가 최소값에 도달하는 위치가 잉크전이점의 위치와 일치한다는 사실을 알 수 있었다.

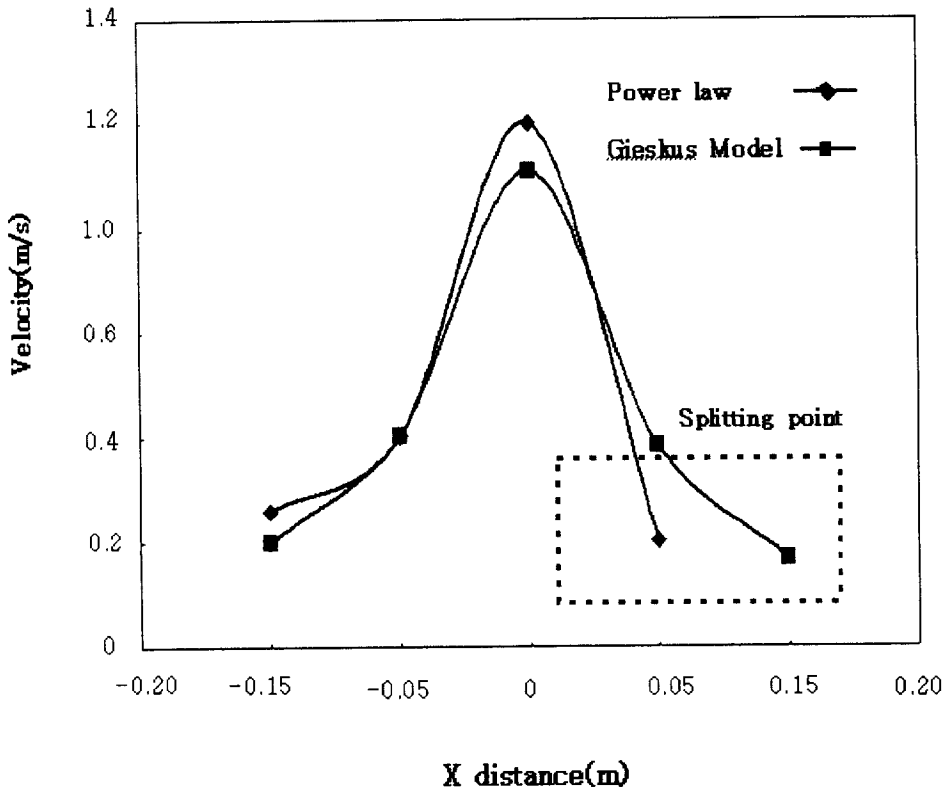


Fig. 21. The velocity according to two models.

4 - 3. 잉크 전이점과 작업 변수

최종 인쇄물의 농도를 결정하는 중요한 요인으로 작용하는 잉크의 전이점의 위치가 각종 변수들에 의해 어떻게 달라지는지를 알아보았다. 특히 작업 변수 조건은 기본적인 잉크의 레오로지 물성에 따라 일반적인 영향이 달라지므로, 잉크의 레오로지 물성은 Newtonian 형에 가까운 Power law 모델을 적용시켰다.

롤러의 속도, 잉크의 량, 그리고 기본적인 잉크의 물성 등의 변수 조건들과 잉크 전이점과의 상관관계에 대해 고찰하였다.

Fig. 22는 잉크량에 따른 분기점을 분포를 속도에 따라 그래프화하였다. 잉크

량과 전이율은 비례하고, 속도에는 반비례한다는 실험적인 연구 결과와 일치함

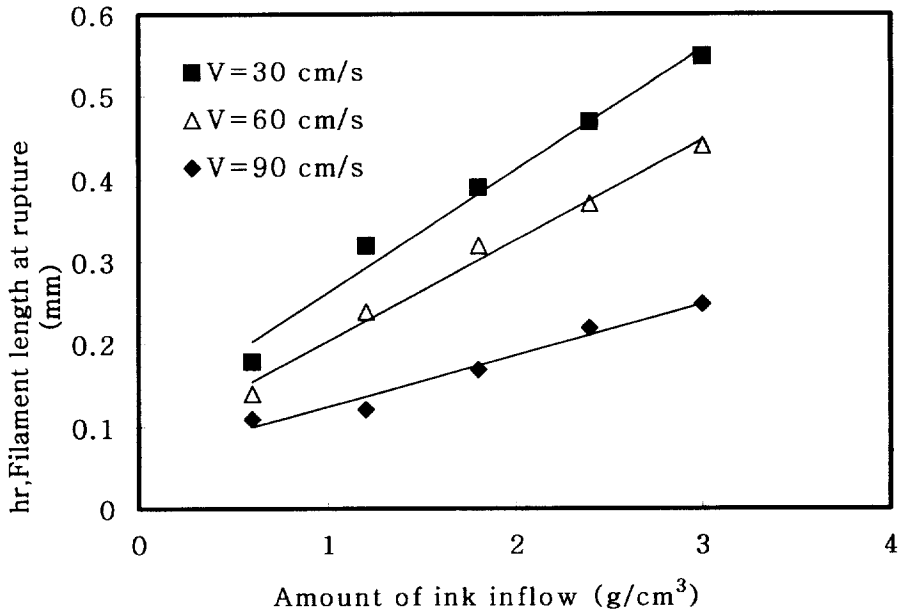


Fig. 22. Filament at rupture according to amount of ink flow.

을 확인하였다.

Fig. 23과 Fig. 24는 저속과 고속에 따른 잉크 량과 점도와의 관계를 나타내었다. 전이율은 속도에 반비례하며 잉크 량과 점도에 비례한다는 전체적인 이론과 일치한다. Fig. 23의 경우는 저속에서의 점도와 잉크 량의 관계를 고찰하였는데, 점도값이 너무 작으면 잉크의 흘러내림 현상이 발생하여 잉크 분열점을 찾지 못하는 경우가 발생하는데, 이 그래프의 경우 잉크 공급량이 $3 \text{ g}/\text{cm}^3$ 이 공급될 때 10 poise의 잉크에 나타남을 확인하였다.

Fig. 24의 고속에서의 경우는 저속과 반대의 경향이 나타난다. 즉, 고점도의 잉크에 공급량이 $3 \text{ g}/\text{cm}^3$ 일 때, 전이점이 나타나지 않는 현상을 보인다.

고점도의 경우는 탄성가가 저점도보다는 크기 때문에 고속이고 잉크량이 많을 때는 탄성체로서 행동한다. 따라서 롤러의 출구에서 전이점을 가질 만큼 잉크가 유동되지 못하기 때문이라고 생각된다

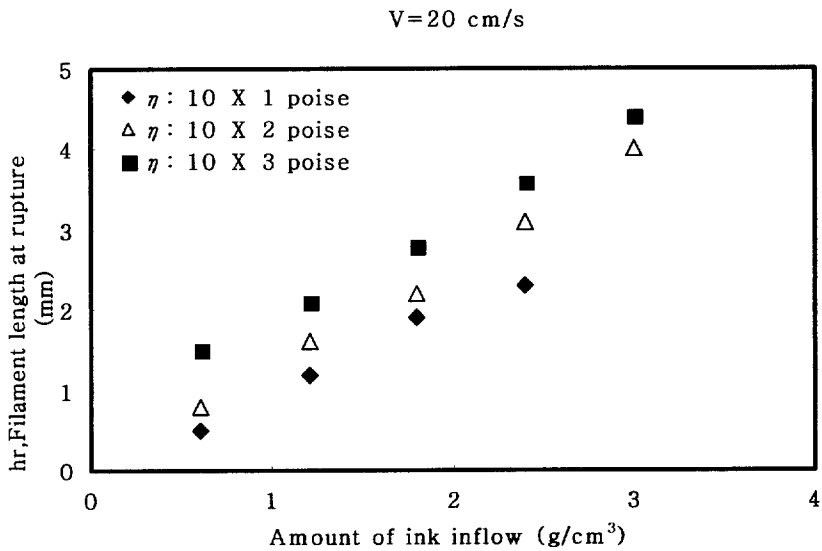


Fig. 23. Filament at rupture position on the velocity 20 cm/sec.

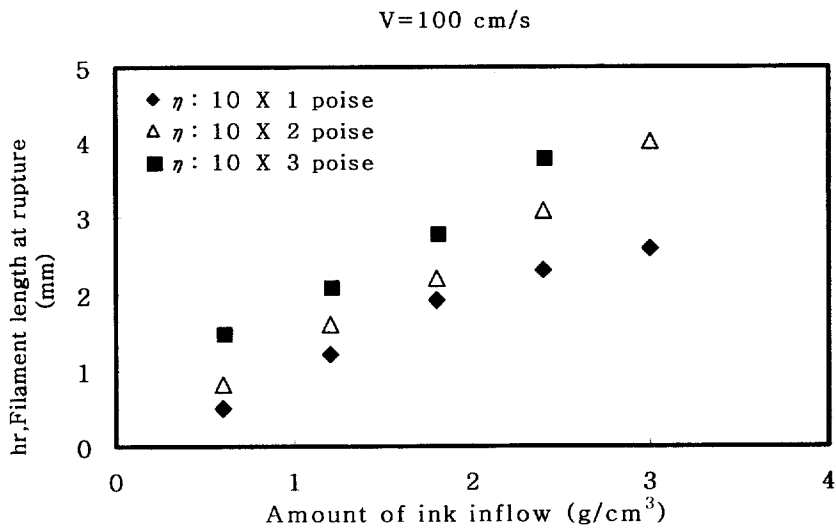


Fig. 24. Filament at rupture position on the velocity 100 cm/sec.

5. 결 론

본 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 인쇄 롤러에서 잉크 전이가 이루어질 때 압력과 속도분포도를 확인할 수 있으며, 이 값들은 동일한 조건일지라도 잉크의 모델에 따라 다른 값을 가짐을 확인하였다.
- (2) 잉크의 레오로지적 물성값에는 점도, 탭, 완화시간 등 여러 가지가 복합적으로 존재하므로 정확하게 정의하기는 어려우나, 각 잉크의 특성에 맞는 모델로 해석한다면, 실제와 가까운 해석이 가능하다.
- (3) 분열되는 잉크의 전이점의 위치는 잉크량이 많을수록, 롤러의 속도가 느릴수록 증가하는 것을 알 수 있다.
- (4) 저속에서 잉크가 저점도일 경우에는 잉크량이 증가하더라도 잉크의 전이점의 위치가 증가하지 않으며 그 이유는 저점도의 잉크가 흘러내림(drainage)현상을 일으키기 때문이다.
- (5) 고속에서 잉크가 고점도일 경우에는 잉크량이 증가하더라도 잉크 전이점의 위치가 계속해서 증가하지는 않는다. 그 이유는 고점도의 잉크는 잉크량이 증가하게 될수록 탄성적인 요인이 증가하기 때문이라 사료된다.

참 고 문 헌

- 1) E. W. Grald, J. A. Kulkarni and A. Dutta, Application of Multiphysics Simulations to Solve Practical Coating Flow Problems, *11th International Coating Science and Technology Symposium*, pp. 181~184 (2002)
- 2) M. A. Johnson and D. W. Bousfield, Viscoelastic Roll Coating Flows, *11th International Coating Science and Technology Symposium*, pp. 1~4 (2002)
- 3) G. Zevallos, M. S. Carvalho and M. Pasquali, Theoretical Analysis of Viscoelastic Film Splitting Flows, *11th International Coating Science and Technology Symposium*, pp. 5~8 (2002)
- 4) M. S. Owens, C. W. Macosko and L. E. Scriven, Misting in Forward Roll Coating, *11th International Coating Science and Technology Symposium*, pp. 52~55 (2002)
- 5) R. B. Rief, L. E. Walkup and C. W. Warner, Electrostatic Control of Misting on High-speed Printing Process, *Taga Proceedings*, pp. 279~291 (1970)
- 6) L. J. Davis and G. W. Poehlein, Theoretical Analysis of Film Splitting, *Taga Proceedings*, pp. 279~291 (1970)
- 7) 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)
- 8) Y. Xiang and D. W. Bousfield, Influence of Coating Structure on Ink Tack Dynamics, *J. Pulp and Paper Science*, Vol. 26, pp. 221~227 (2000)
- 9) D. J. Guerrette, A Steady State Inking System Model for Prediction Ink Film Thickness Distribution, *Taga Proceedings*, pp. 227~235 (1970)
- 10) J. MacPhee, An Engineer's Analysis of the Lithographic Printing Process, *Taga proceedings*, pp. 237~275 (1979)
- 11) S. N. Ercan and D. W. Bousfield, Influence of Fluid Rheology on Filament Size, *2000 Tappi International Printing and Graphic Arts*, pp. 121~132 (2000)
- 12) A. C. Zettlemoyer and R. R. Myers, The Rheology of Printing Inks, *Rheology Theory and Application Academic Press*, Vol. 3, pp. 87~98 (1960)
- 13) P. Oittinen and O. Perila, On the Rheological Properties of Printing Inks Part I. Flow Curve Behaviour and Tack, Helsinki University of Technology, Finland, pp. 95~104 (1972)
- 14) J. Macphee, A Unified view of the Film Splitting Process Part II, *Ameri-*

can Ink Maker, pp. 51~56 (1997)

15) A. Voet and Boger, The Printing Process, *American Ink Maker*, pp.73~87 (1960)

16) L. H. Sjodahl, Ink Flow on Rotating Rollers, *American Ink Maker*, pp.31~57 (1951)

17) J. H. Taylor and A. C. Zettlemoyer, Hypothesis on the Mechanism of Ink Splitting During Printing, *Tappi*, **Vol. 41**, pp. 749~757 (1958)

18) R. Sizaïre and V. Legat, Finite Element Simulation of a Filament Stretching Extensional Rheometer, *J. Non-Newtonian fluid mechanics*, pp.87~107(1997)

19) M. I. Kolte and P. Szabo, Capillary Thinning of Polymeric Filaments, *The Society of Rheology Inc.* pp. 609~625 (1999)

20) O. W. Gregersen, P. O. Johnsen and T. Helle, Small-scale Topographical Variations of Newsprint Surfaces and Their Effects on Printing Ink Transfer Distribution, *J. Pulp and Paper Science*. **Vol. 21**, pp. 331~336 (1995)

21) M. Yao, S. H. Spiegelberg and G. H. McKinley, Dynamics of weakly Strain-hardening Fluids in Filament Stretching Devices, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* pp. 1~43 (2000)

22) J. T. Youn and D. W. Bousfield, Filament dynamics in Steady stretching and Cycle Tests, *11th International Coating Science and Technology Symposium*, pp. 171~174 (2002)

23) J. T. Youn, Introduction of Printability, Chapter 10, pp. 223~240, Pukyong National University, South Korea, (2004)

24) J. T. Youn, Introduction to Printing Science, Chapter 2, pp. 14~28 Pukyong National University, South Korea, (1997)

25) J. H. De Grace, J. E. Dalphond and P. J. Mangin, A Mechanistic Approach to Ink Transfer Part III : Properties of Ink Filaments in Printing Nips, pp. 38~43, Canada, (2002)

26) C. E. Coco and K. B. Cockerline, Using the Prufbau Test to Predict Web Offset Ink Piling, *J. Tappi*, pp. 71~78 (1998)

감사의 글

논문이 완성되기까지 많은 분들의 도움을 받았습니다. 저에게 많은 도움을 주신 분들께 진심으로 감사를 드립니다.

많은 갈등과 고민이 있을때마다 항상 많은 조언과 격려를 해주시며 방향을 제시해 주셨던 윤종태 지도교수님, 본 논문을 심사하여 주시고, 관심과 충고를 해주신 구철희 교수님, 남수용 교수님께도 감사를 드립니다.

또한 학부, 대학원 생활 속에서 많은 가르침을 주셨던 김성빈 교수님, 손세모 교수님, 강상훈 교수님, 이상남 교수님, 안석출 교수님께 감사드립니다.

늘 든든한 힘이 되어주었던 인쇄적성실 선후배님들, 어려움이 있을때마다 도움을 주었던 대학원 선배들, 항상 옆에 있어주었던 순심, 상희, 정란, 혜정이와 그리고 나의 오래된 벗 계은이에게 고맙다는 말을 전합니다.

오늘의 제가 있기까지 6년동안이나 친딸처럼 보살펴주신 큰이모와 외삼촌, 그리고 외할머니, 저희 삼남매를 위해서 너무나 많은 것을 해 주신 아버지와 어머니, 그리고 함께 있어서 든든한 윤식이, 언제나 손자, 손녀 걱정해주는 할머니, 대한 민국 육군이 된 막내 동생과 오늘의 이 영광을 함께 하고 싶습니다.