

인쇄롤러 틸새에서 잉크 전이의 시뮬레이션에 관한 연구

이미정[†], 윤종태

[†]부경대학교 대학원 인쇄공학과, 부경대학교 공과대학 화상정보공학부
(2005년 10월 17일 접수, 2005년 11월 18일 최종 수정본 접수)

Simulation of Ink Transfer in the Printing Nip

Mi-Jung Lee[†], Jong-Tae Youn

[†]Dept. of Graphic Arts Engineering, Graduate School, Pukyong National University,

*Division of Image & Information, College of Engineering, Pukyong National University

(Received 17 October 2005, in final from 18 November 2005)

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.

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 복합적으로 작용하기 때문에 과학적으로 규명하기가 어려운 실정이다.

롤러와 피인쇄체 사이에서 유체의 전이에 관한 연구는 지금까지 많은 연구자들에 의해 연구가 진행되어 왔다.^{1~3)} 그들은 롤러 틸새(nip)사이에 존재하는 압력 분포도와 틸새 출

구에서 일어나는 잉크 분열(rupture)에 관해 공동(cavitation) 현상과 잉크 형성(filamentation), 그리고 롤러 사이의 힘에 의해 발생하는 뱅크(bank)부분에 관한 이론들을 제시하였다.

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⁾ 잉크의 비중 등 잉크의 물성에 따른 유체의 전이 현상을 연구했으며, Deborah는 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 요소로 작용한다.

하지만, 현실적으로 롤러 틈새에서 잉크 분열은 매우 순간적이고, 단시간에 일어나는 현상으로 실험으로 관찰하기에는 많은 어려움이 있다. 특히 잉크 롤러에서 피인쇄체로의 전이현상은 잉크의 기본적인 레오로지뿐만 아니라, 다양한 환경변수의 영향을 받기 때문에 현실적으로 모든 조건들을 고려하여 실험을 하는 것이 매우 어려운 실정이다.

따라서 본 연구는 기본적인 잉크전이 메커니즘을 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 계면과 속도, 점도, 압력 분포등을 해석하고자 하였다.

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. 시뮬레이션

틈새 사이에서 잉크 거동은 대칭형이므로 2차원적인(plane method) 방법에서도 충분

히 잉크 전이점 및 유동을 볼 수 있으므로, CPU 시간을 절약하고 간단화하기 위하여 2-D(two dimension) 방법을 선택하였다. Fig. 1은 직경이 40 cm인 상부 롤러와 하부 롤러 틸새에서 잉크가 $Q(\text{cm/s}^3)$ 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.

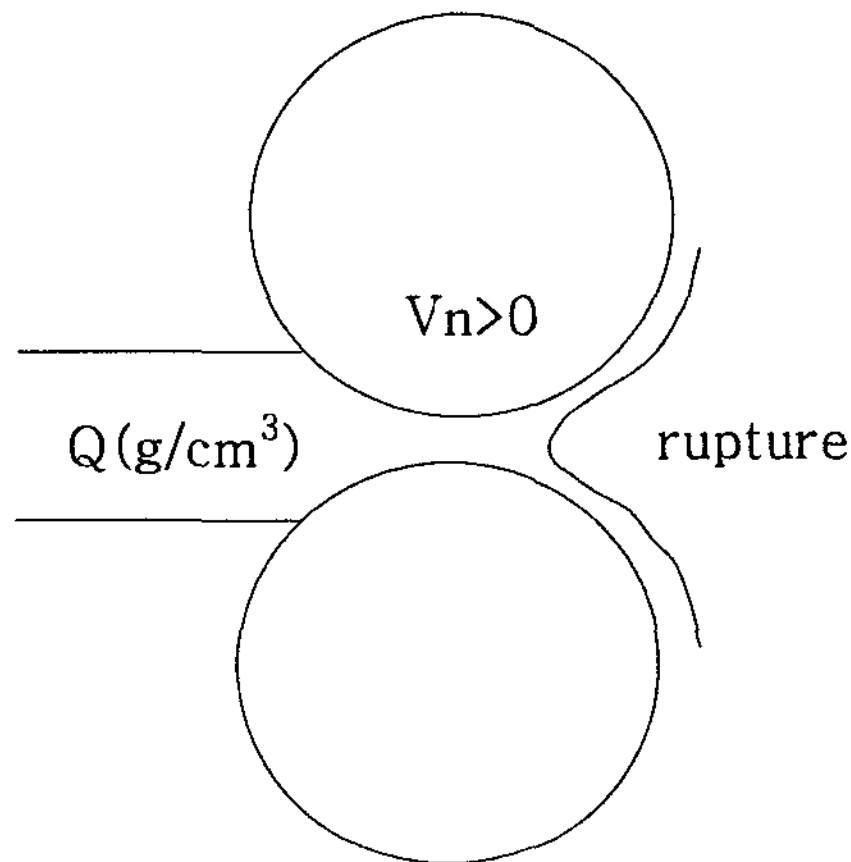


Fig. 1. Description of the symmetric ink transfer.

Table 1은 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 1. 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- V_n		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. 2은 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.

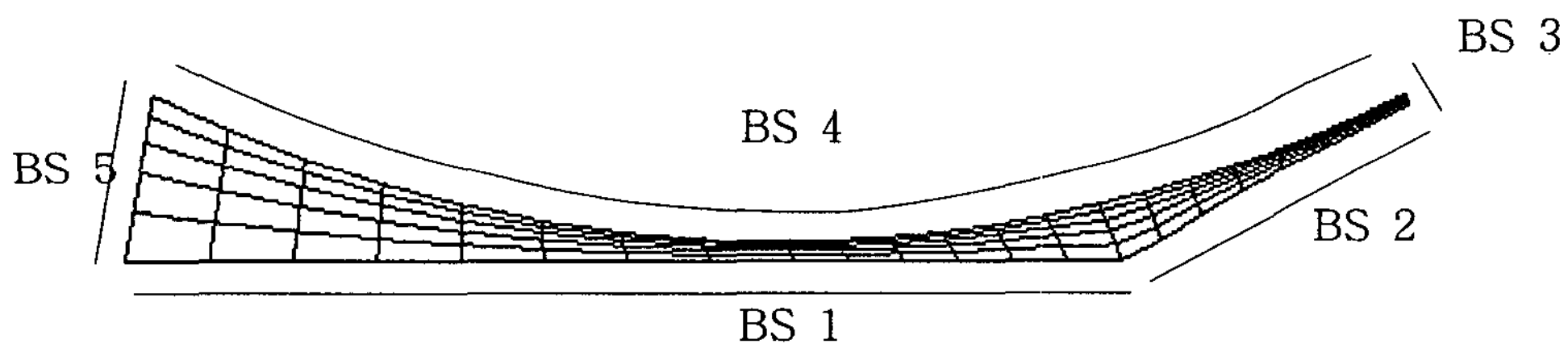


Fig. 2. Finite element mesh and boundary sets.

- 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)

3. 결과 및 고찰

3-1. 잉크의 거동 모습 및 압력 분포

3-1-1. 잉크의 전이 이론

Walker-Fetsko의 잉크의 전이 정수 k, b, f 값과 전이 이론 모델을 과학적으로 규명

하기 위해 두 롤러의 물성은 동일하며 잉크가 이상적인 분열, 즉 1:1의 양으로 전이가 되는 모습을 시뮬레이션 하였다. Fig. 3는 이상적인 전이 모델에 롤러의 속도나 잉크의 량과 점도 등과 같은 변수를 두었을 때 그 결과를 나타낸 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.

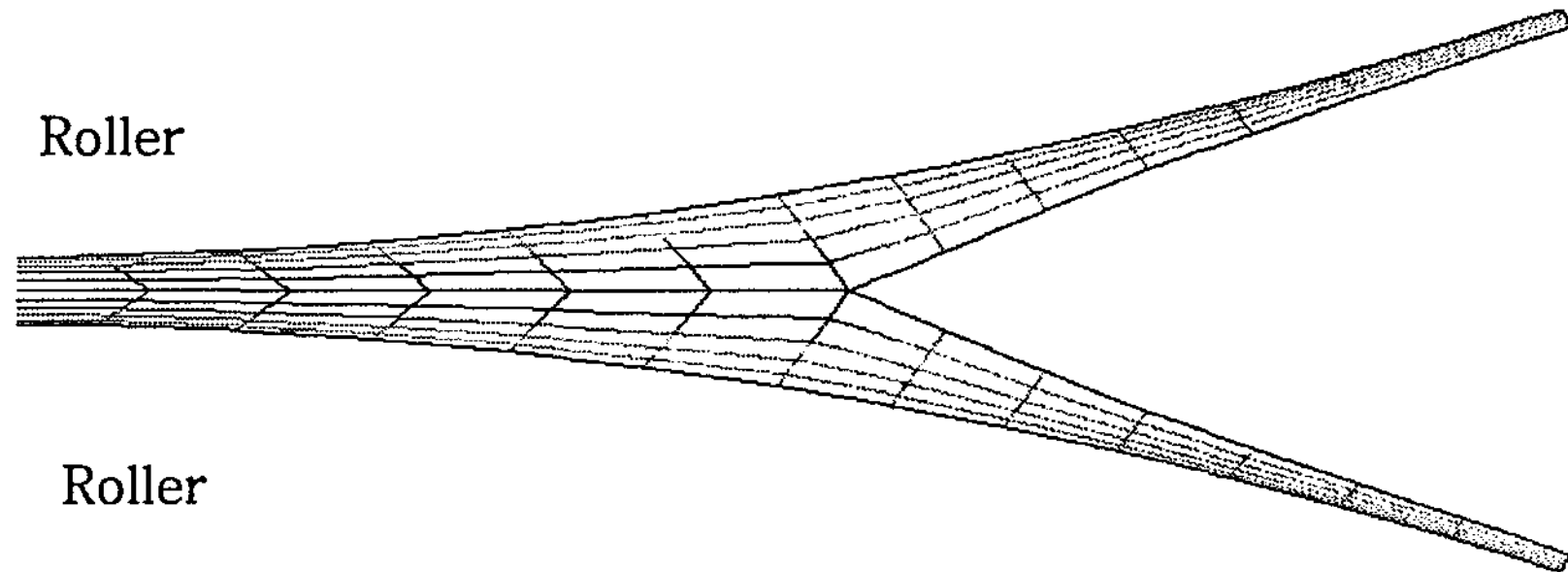


Fig. 3. The theoretical ink transfer was proved(real model).

Fig. 4의 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.

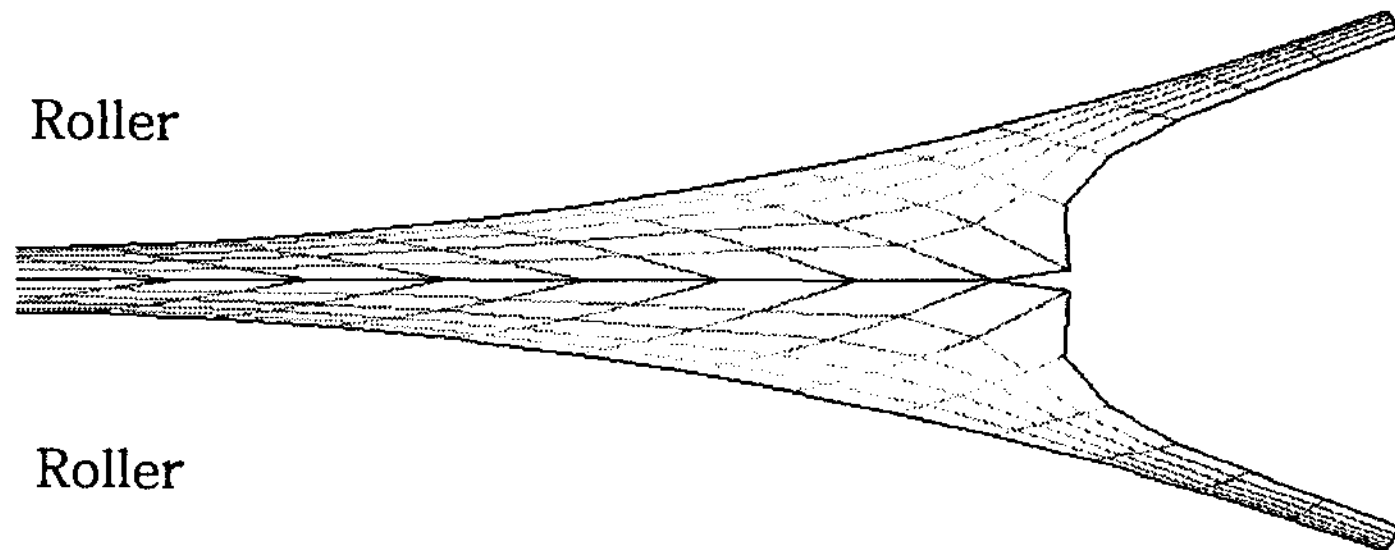


Fig. 4. The theoretical ink transfer was proved(experiment).

다음 Fig. 5은 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 6는 Coco와 Cockerline의 Prufbau test기를 이용하여 피인쇄체로 전이되는 잉크 즉, 고정화 잉크량의 시간에 따른 전이율을 연구하였다. 그들의 연구결과에 통해 고정화 잉크량의 경우 단시간 내에 전이가 되는 량이 많으며, 전이 시간 또한 상당히 짧은 것을 알 수 있다.

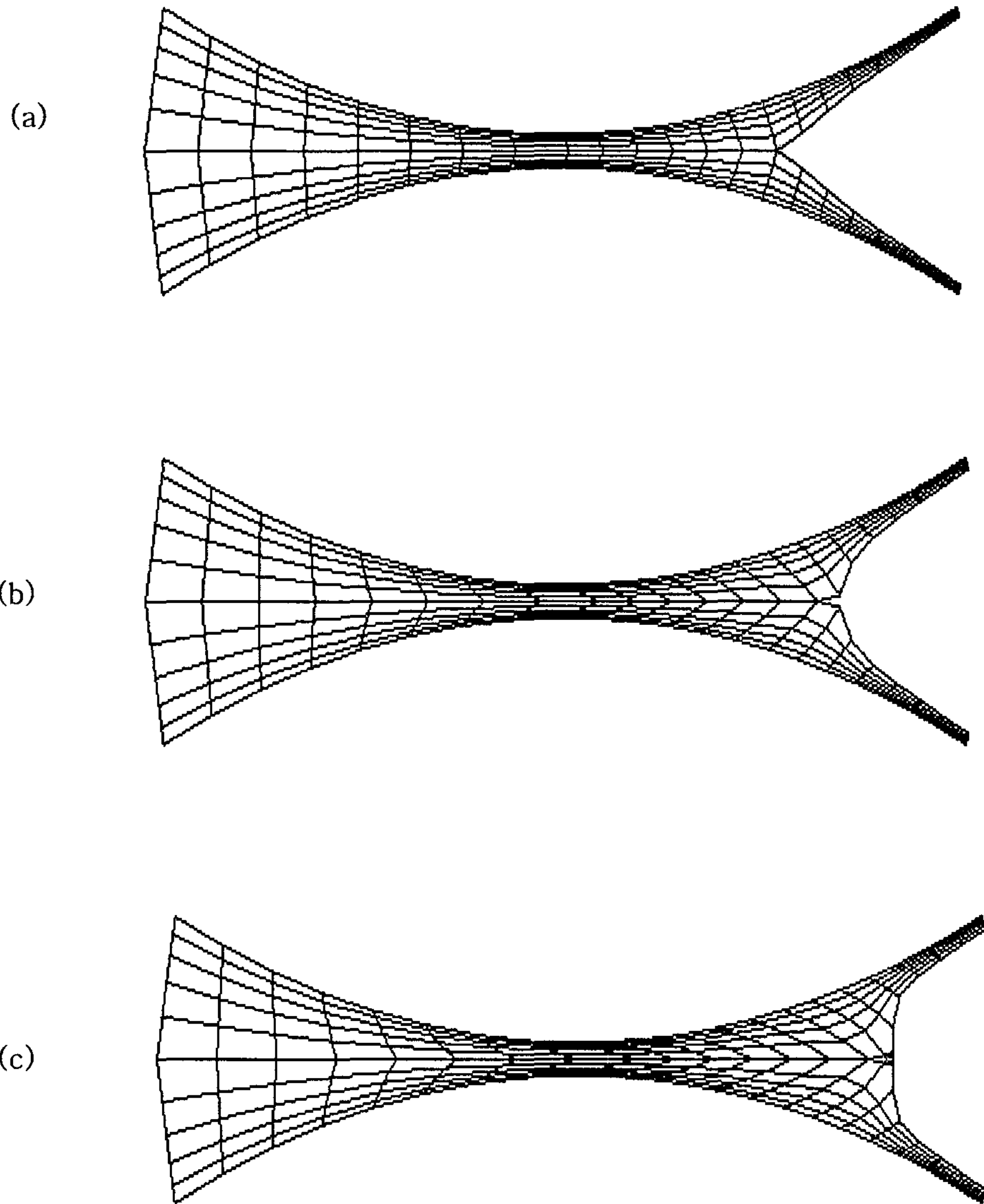


Fig. 5. The each ink transfer model according to the time intervals.
((a) 0 sec, (b) 0.50 sec, (c) 1.00 sec)

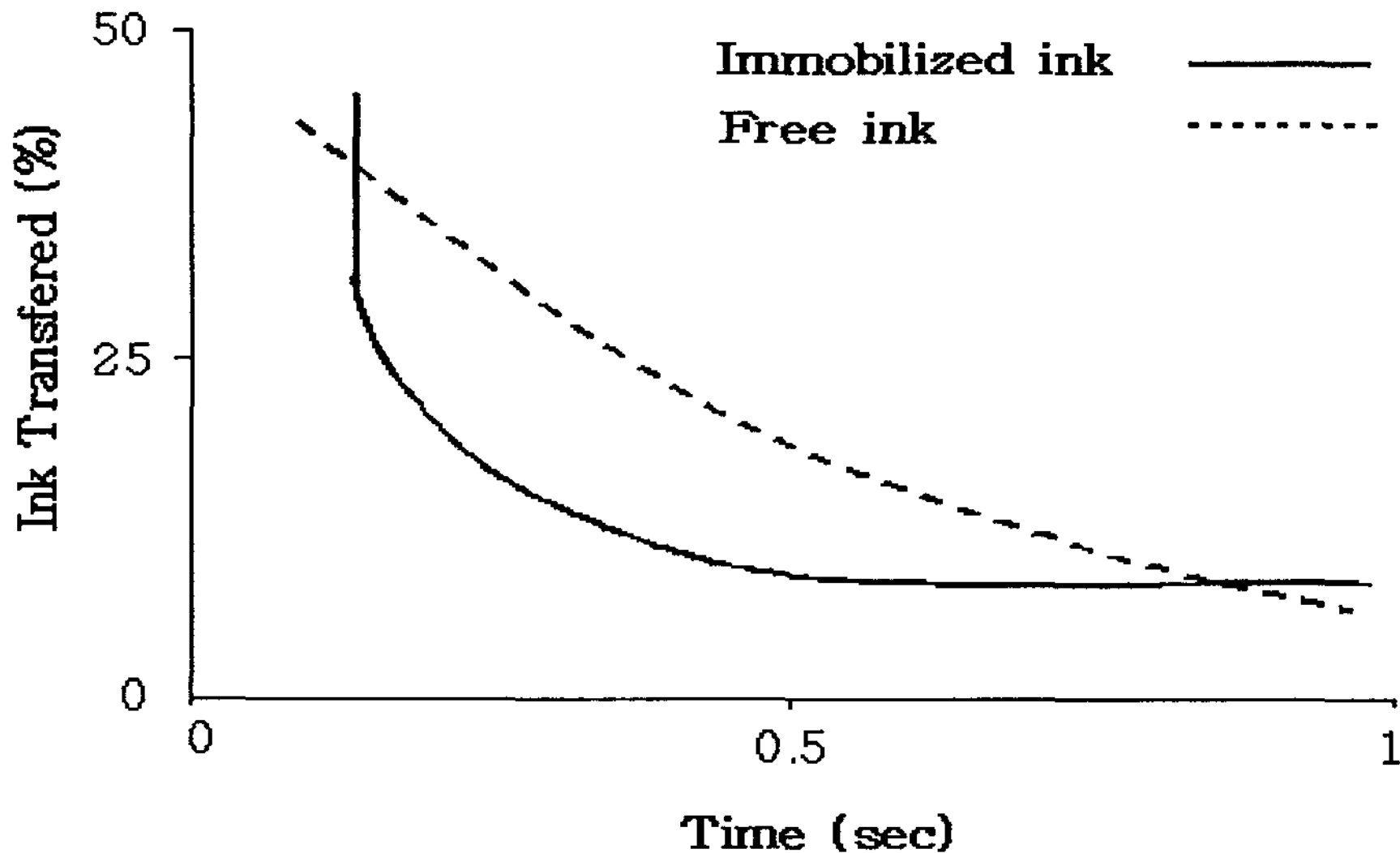


Fig. 6. The two types ink according to the print time.

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 단시간 내에 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. 7은 일반적인 잉크 전이율 곡선을 나타내며 Fig. 8는 시뮬레이션을 통해 시간에 따른 잉크 분열점을 프로파일화한 것이다. 이 두 그래프 모두 잉크 전이의 전반적인 양상이 비슷함을 보여주고 있다.

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

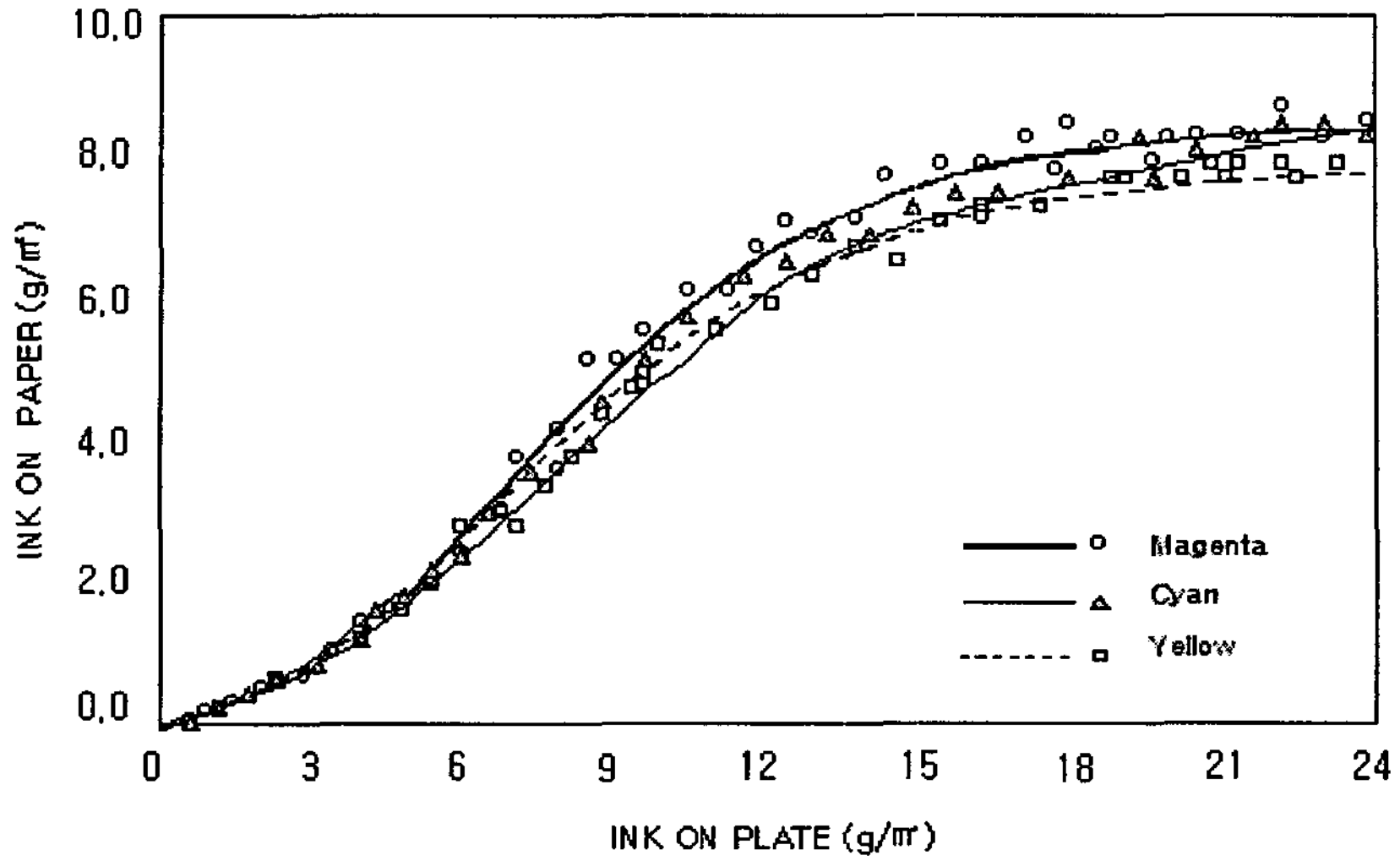


Fig. 7. Ink transfer curve.

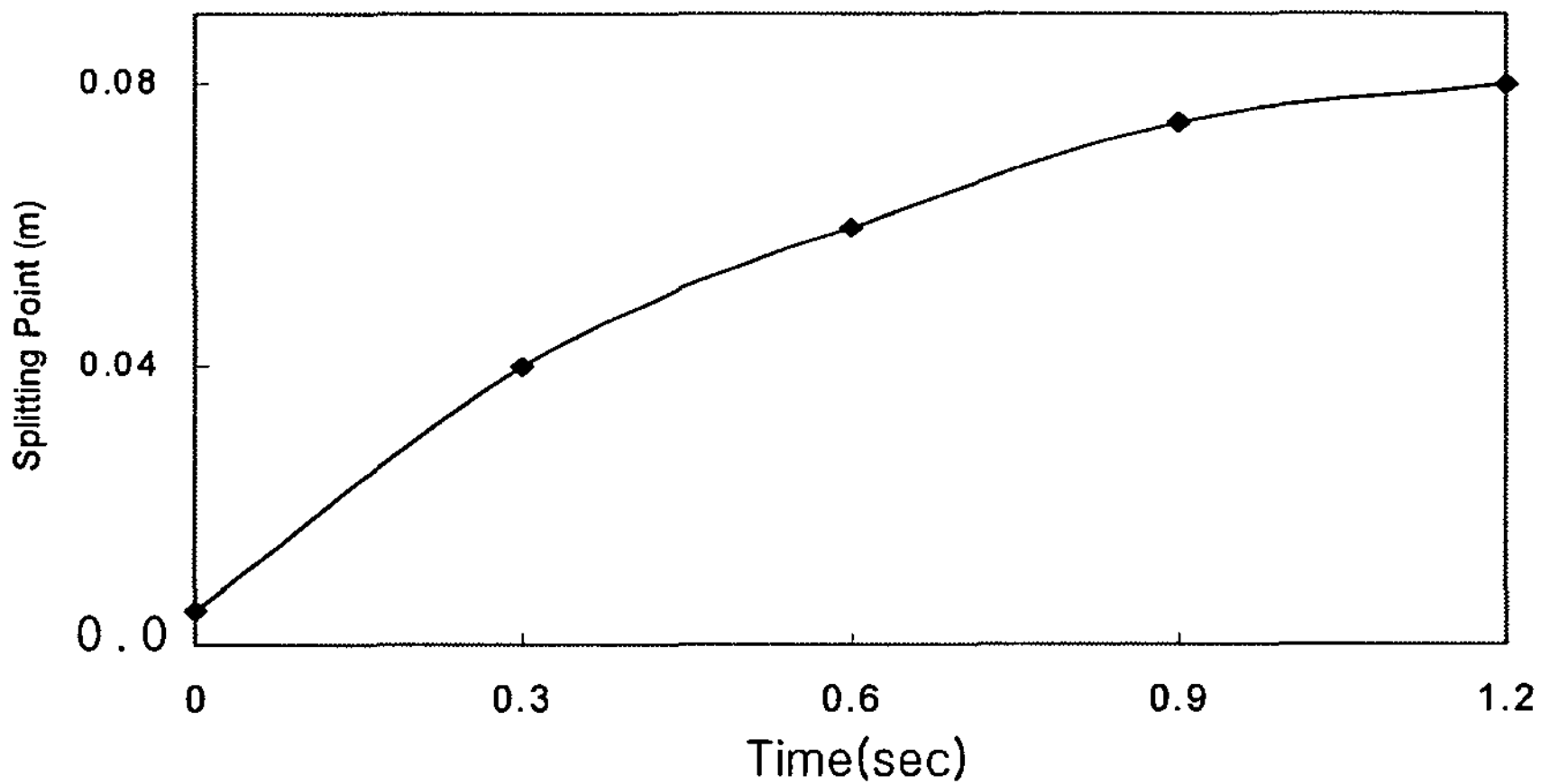


Fig. 8. Splitting point from the nip center.

3-1-2. 압력 및 속도 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. 9는 모사한 잉크 전이 모델의 압력을 등고선(contour)으로 나타내었고 Fig. 10은 그래프로 나타내었다. 압력의 분포도는 이론과 모사된 전이 모델에서 일치함

을 확인할 수 있었고, 실제 롤러에 선속도 값이 주어진 후 잉크의 전이가 일어날 때 틈새의 중앙에서 급격하게 입력이 떨어지고, 틈새의 출구에 부압력값이 걸리는 지점에서 잉크의 분열이 일어난다고 유추할 수 있었다.

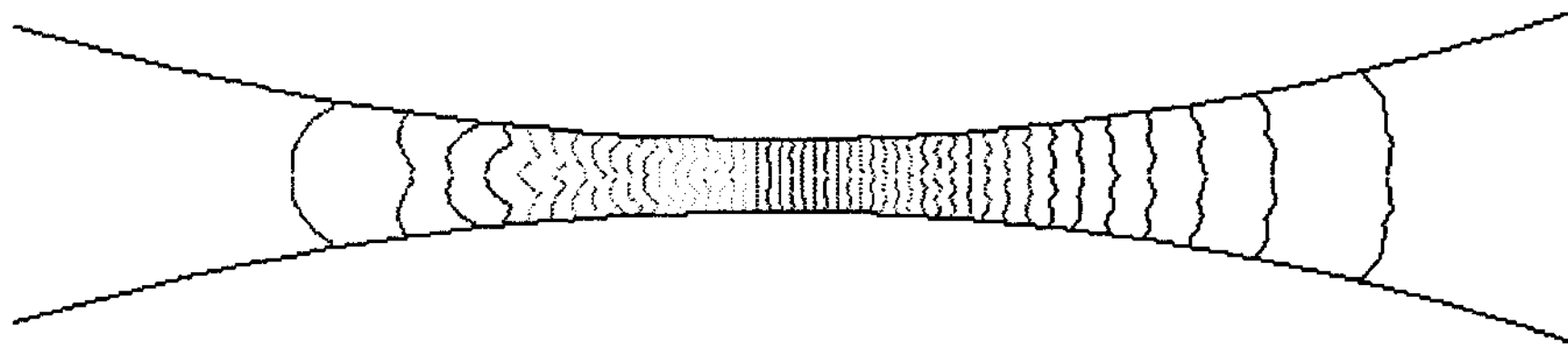


Fig. 9. The pressure contour in the nip.

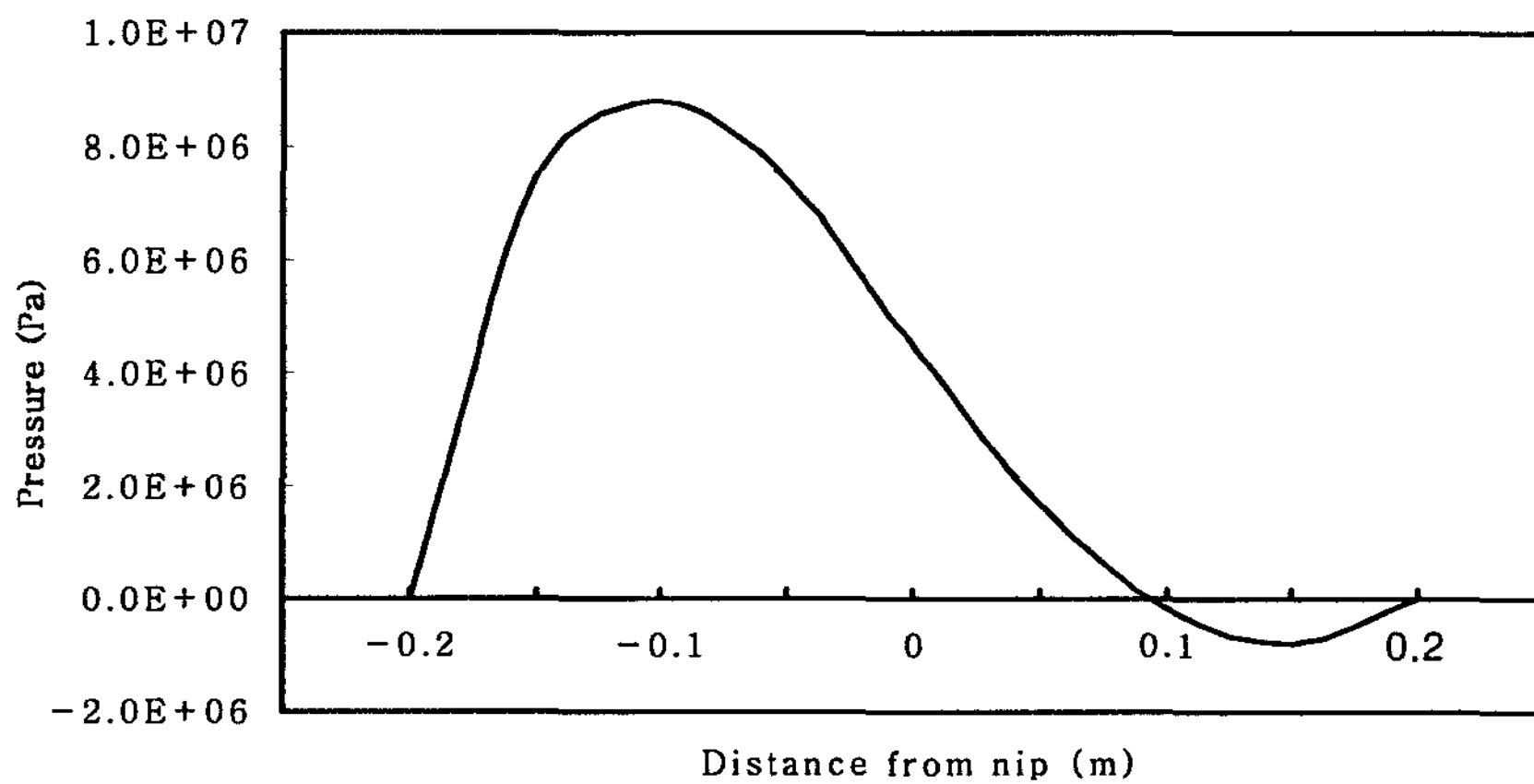


Fig. 10. The pressure profile in the distance from nip.

Power law 모델의 속도분포도는 다양하게 표현할 수가 있다. 다음 Fig. 11은 동일한 속도 값의 분포를 알 수 있는 등고선 형태이며, Fig. 12은 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 변형을 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.

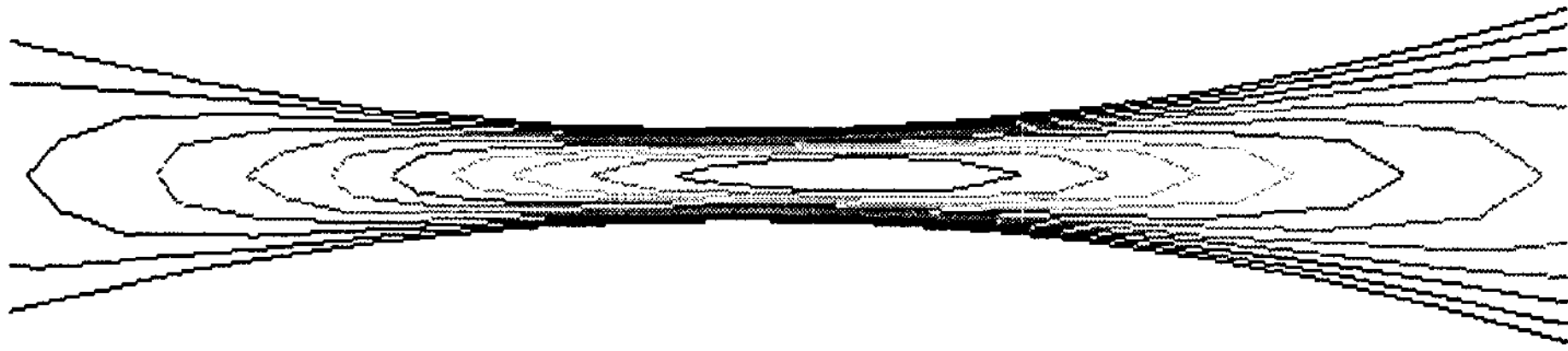


Fig. 11. The velocity contour in the distance from nip.

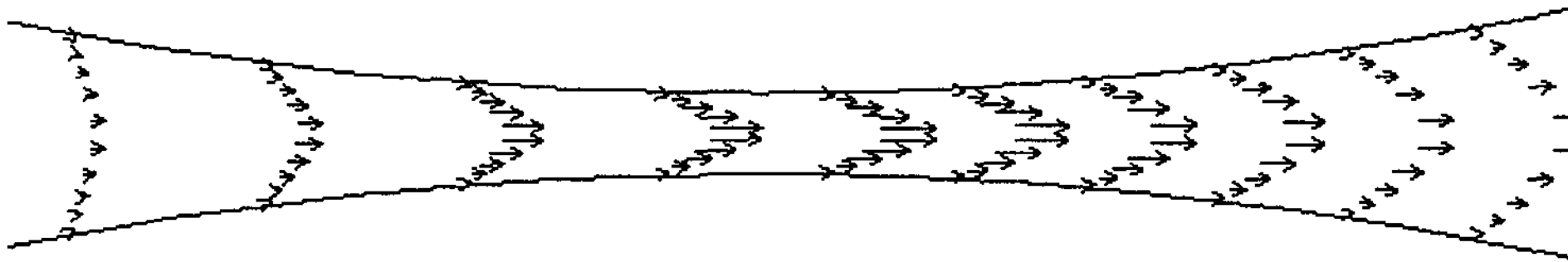


Fig. 12. The velocity vector in the distance from nip.

3-2. 잉크 모델에 따른 비교

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

Table 2은 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 2. The Parameters according to Ink Model

Parameter \ Model	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. 13는 각 모델들의 마지막 유동 모습을 mesh화하여 틈새 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 모델

의 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 Oldroyd-B 모델에서는 미스팅과 같은 인쇄 불량 문제가 발생하리라 사료된다.

다음 Fig. 14는 non-newtonian 모델을 달리했을 때, 잉크전이모델에서 속도 변화를 살펴본 것이다. 틈새의 입구와 출구에서는 잉크 속도가 낮았으나, 틈새 중앙에서 최고의 속도값을 나타냈었다.

Fig. 15은 위의 두 모델의 닙의 거리에 따라 속도 분포도의 변화를 그래프로 비교한 것이다. 롤러 틈새의 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 잉크 전이점의 위치와 일치한다는 사실을 알 수 있었다.

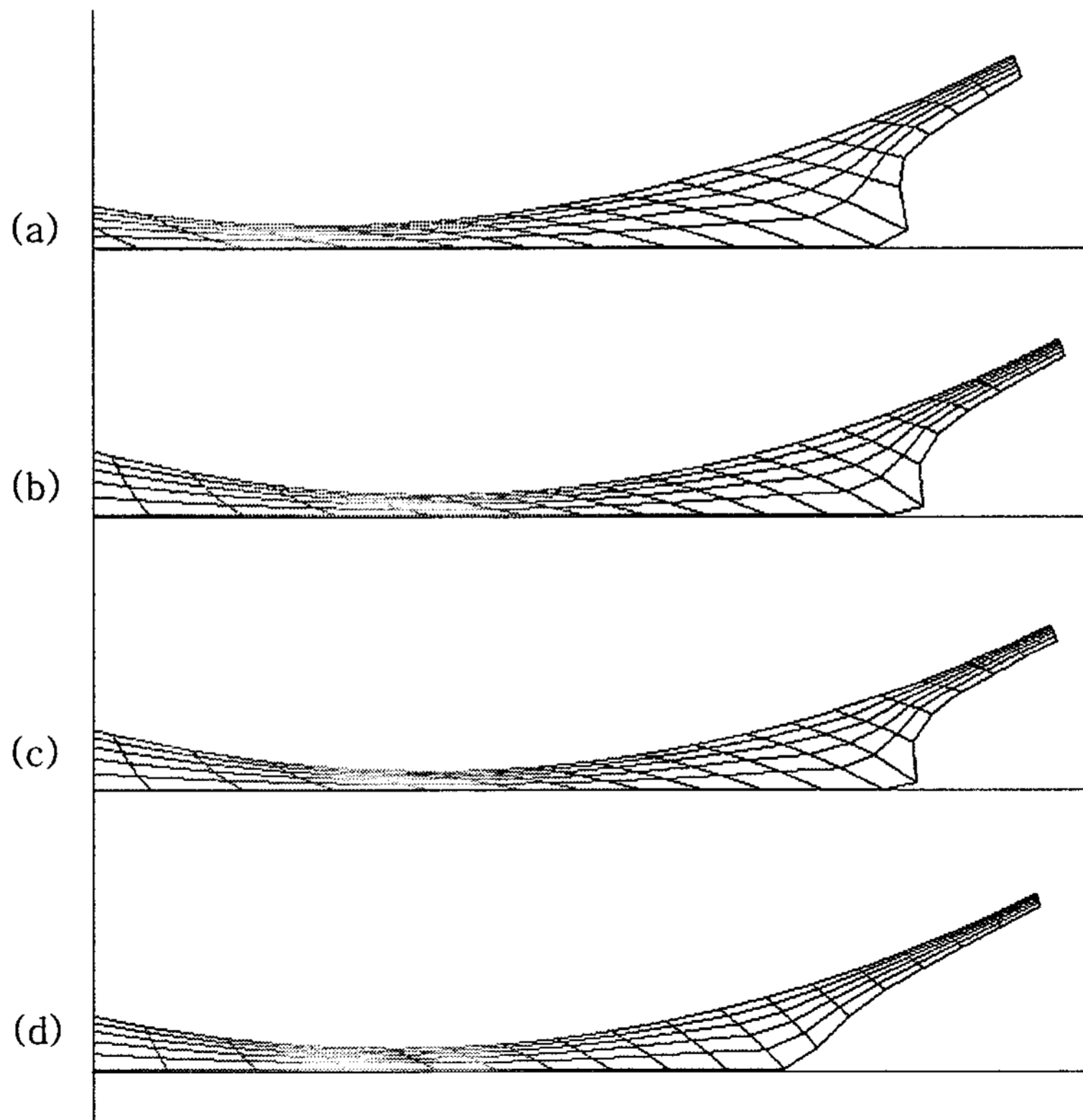


Fig. 13. The X, Y position on the free surfaces of each models.

- ((a) Newtonian model, (b) Power law model,
- (c) Oldroyd-B model, (d) Gieskus model)

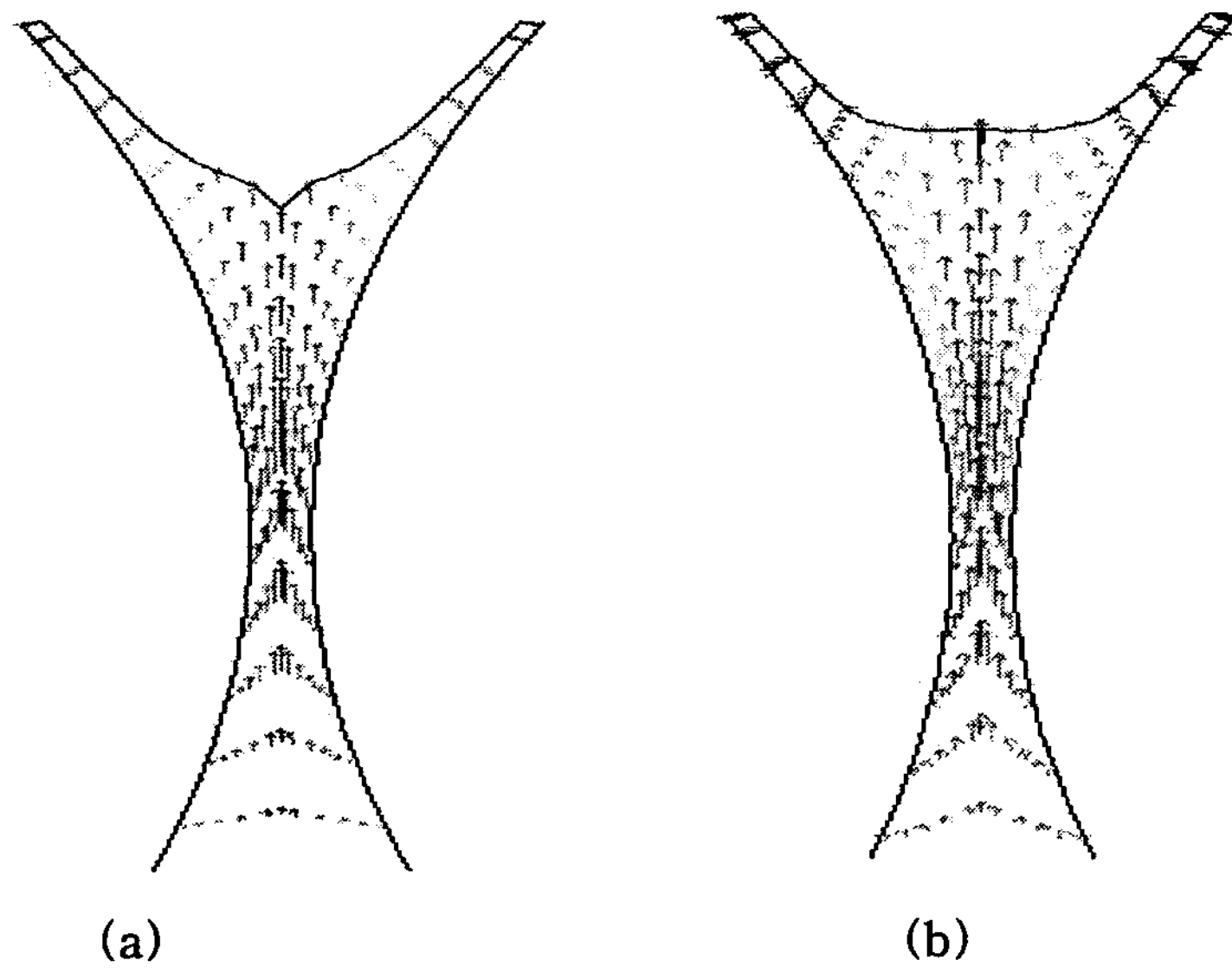


Fig. 14. The results of different models on the stream function.
((a) Gieskus model, (b)Power law model)

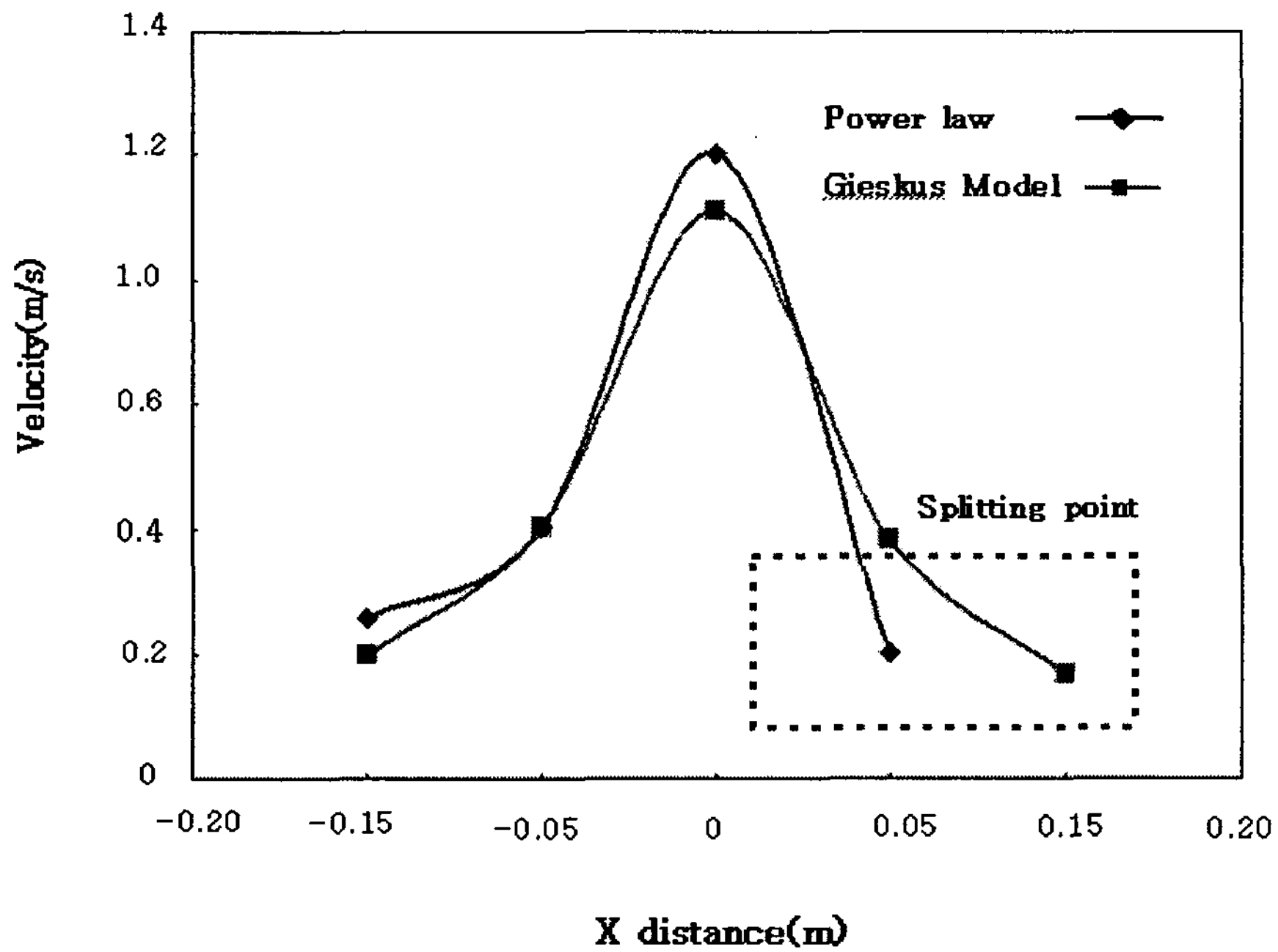


Fig. 15. The velocity according to two models.

4. 결 론

이 연구를 바탕으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 잉크의 전이 이론을 바탕으로 고정화 잉크량과 자유 잉크량의 관계를 시뮬레이션을 통하여 확인할 수 있었으며, 전이 이론 모델과 시뮬레이션 결과가 일치함을 확인하였다.
- (2) 인쇄 롤러에서 잉크 전이가 이루어질 때 압력과 속도분포도를 확인할 수 있으며, 이 값들은 동일한 조건일지라도 잉크의 모델에 따라 다른 값을 가짐을 확인하였다.
- (3) 잉크의 레오로지적 물성값에는 점도, 텍, 완화시간 등 여러 가지가 복합적으로 존재하므로 정확하게 정의하기는 어려우나, 각 잉크의 특성에 맞는 모델로 해석한다면, 실제와 가까운 해석이 가능하다.

참고문헌

- 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, D. W. Bousfield, Viscoelastic Roll Coating Flows, *11th International Coating Science and Technology Symposium*, pp. 1~4 (2002).
- 3) G. Zavallos, 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, 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, C. W. Warner, Electrostatic Control of Misting on High-speed Printing Process, *Taga Proceedings*, pp. 279~291 (1970).
- 6) L. J. Davis, G. W. Poehlein, Theoretical Analysis of Film Splitting, *Taga Proceedings*, pp. 279~291 (1970).
- 7) J. S. Aspler, Y. H. Zang, and L. Larrondo, L. Perron, Printing Tack Development and Coated Paper Structure, Pulp and Paper Research Institute of Canada, pp. 162~177 (1997).