

浮遊選別법을 適用한 脫墨工程의 界面化學的 및 水力學的 原理(II) - 水力學的 原理를 中心으로 -

朴宣映 · 金東秀

梨花女子大學校 環境工學科

Interface Chemical and Hydrodynamic Aspects of Deinking Process Using Flotation for Waste paper Recycling(II)

Sun-Young Park and Dong-Su Kim

Dept. of Environmental Sci. & Eng., Ewha Womans University

요 약

부유선별법에 의한 탈묵공정에서 잉크입자와 기포의 부착은 상호간의 충돌에 의한 것인데, 충돌의 가능성은 주로 수력학적 조건에 지배된다 따라서, 부유선별법에서 미세입자의 제거효율이 낮은 이유는 수력학적 영향에 의해 입자가 기포주위의 수층유선을 따라 흘러내리는 경향이 있으므로 기포와의 충돌이 어렵기 때문이라고 해석되어 진다. 또한, 크고 무거운 잉크입자의 경우에는 기포에 의한 부상과정에서 중력과 점성력 등의 영향을 크게 받으므로 부유선별에 의한 제거가 어렵다고 간주되어 진다 따라서, 부유선별의 실제공정에서는 계면화학적 측면에서의 조건선정 뿐만 아니라, 잉크입자와 기포의 크기를 조절하는 수력학적 관점에서의 조절이 또한 중요하다

ABSTRACT

In the flotation system for deinking process, the ink particles must collide with the air bubbles for adhesion. The probability of bubble-particle collision is largely dependent on the hydrodynamic conditions. The main reason for the very small ink particles not to be able to float easily may be found in the hydrodynamic effects, which make small ink particles move following the streamlines around the bubbles rather than actually collide with bubbles. Also, the low floatability of the large and heavy ink particles is due to the gravity force and viscous drag which affect uprising motion of particles through the liquid. Therefore, it is very important to control not only the surface chemical conditions but the hydrodynamic conditions in practical flotation system for deinking process.

1. 서 론

고지 제사용에 있어서 가장 중요하게 고려되어야 할 사항은 완성된 재생펄프의 백색도이므로 잉크를 종이의 섬유로부터 제거하는 탈묵공정이 매우 중요하다고 할 수 있다. 이러한 탈묵공정 중 현재 가장 널리 사용되고 있는 것이 부상부유 탈묵공정(flotation)인데,¹⁾ 이는 폐지에서 발견되는 잉크입자들의 넓은 범위를 제거할 수 있다는 장점이 있다. 하지만, 각각의 탈묵공정들은 다양한 잉크입자들의

크기에 따라 그 제거 효율이 다르므로, 부유선별만으로는 제거하기 어려운 잉크입자들을 제거하고 점착물과 플라스틱과 같은 오염물의 제거를 위해서 Flotation은 Cleaner, Screen 등의 여러개의 단위공정들을 거침으로써 거의 모든 종류의 잉크입자가 제거될 수 있다.²⁾

Fig. 1은 pulper안에서 분산된 잉크입자들의 크기분포 (Fig. 1(top))와, 각각의 단위공정에서의 잉크입자 크기에 따른 제거효율(Fig. 1(bottom))을 나타낸 것이다.^{3, 4)} 이에 따르면, Washing은 10 μm 이하의 아주 작은 입자들의 제거에

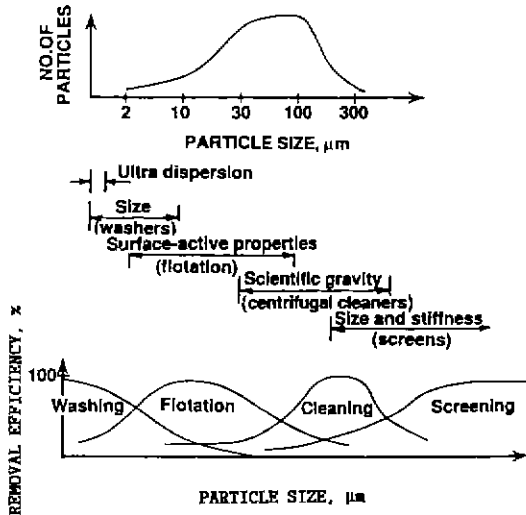


Fig. 1. Particle size distribution in the pulper (top) and unit removal efficiency (bottom).

효과적이고, Flotation은 펄프제조기(pulper)안에 가장 많이 존재하는 입자범위인 10~100 μm에서 그 제거효율이 가장 좋으며, Cleaning은 100~150 μm 그리고 Screening은 1000 μm 이상의 큰 입자제거에 효과적임을 알 수 있다.

이와같이 부유선별법은 10~100 μm의 입자제거에 적합함을 알 수 있는데, 이 범위에서는 입경이 클수록 부유선별의 효율이 향상된다는 실험결과가 보고된 바 있다.^{5,6)} 이러한 사실은 부유선별 시간에 따른 평균입경의 변화를 나타낸 Fig. 2의 자료로부터도 더욱 명백히 알 수 있다.⁶⁾ 이에 따르면, 부유선별 전에는 잉크의 평균입경이 5.9±0.5 μm 정도였는데, 초기 5분 동안의 부유선별에 의해 평균입경의 분포가 약 40% 정도 감소하는 쪽으로 이동함을 알 수 있다. 즉, 큰 입자들이 작은 입자들보다 먼저 부상하게 되고, 미세 입자의 부유선별 효율은 매우 낮다고 해석될 수 있다. 따라서, 부유선별과정 중에 미세한 입자들이 형성되는 조건을 파악하여, 미세입자의 형성을 최소화하는 것이 부유선별법을 효과적으로 수행하는 중요한 요인이 될 것이다.

이처럼 잉크입자의 크기가 탈잉크 효율에 미치는 영향을 이해하기 위해서는 수력학적 측면에서의 고찰이 중요하다. 그러므로, 본 연구에서는 부유선별법에 의한 탈잉크 원리를 수력학적 측면에서 생각해 보고, 실제 탈잉크 효율을 향상시키기 위해서 고려해야 할 요인들에 대해 고찰해 보았다.

2. 부유선별의 이론

부유선별법은 섬유 표면으로부터 탈리되어 적절한 크기

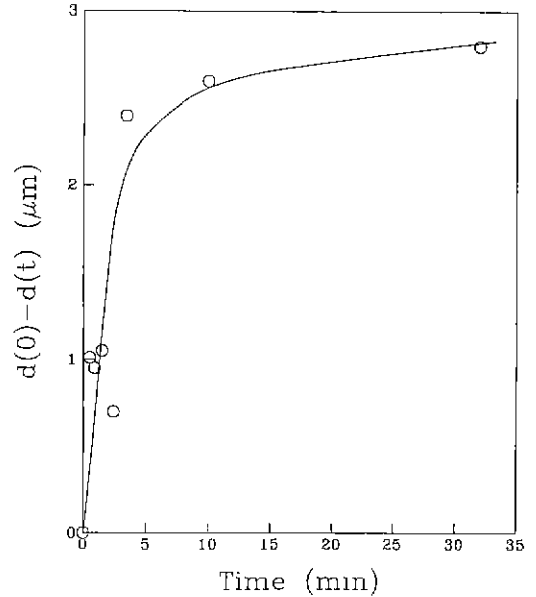


Fig. 2. Ink particle mean diameter before flotation [d(0)] minus the mean diameter of the remaining particles after 1 min flotation [d(t)].

로 분산된 잉크입자가 수중에서 상승하는 기포의 포집에 의해 제거되는 공정이므로, 잉크입자가 기포에 효과적으로 부착될 수 있는지의 여부가 가장 중요하게 고려되어야 할 사항이다. 이러한 부착이 가능하기 위해서는 먼저 잉크입자들이 기포와 충돌해야 하므로, 기포에 의한 잉크입자의 부착과정은 다음과 같이 표현된다.⁷⁾

$$P = P_c \cdot P_a \tag{1}$$

P : the probability of particle capture by an air bubble
 P_c : the probability of collision
 P_a : the probability of attachment

식(1)에서 잉크입자와 기포의 부착의 가능성 P_a 는 계면화학적 조건에 의해 영향을 받지만, 충돌의 가능성 P_c 는 입자와 기포의 크기와 관련되고 주로 수력학적 조건에 지배된다고 간주되고 있다. 따라서, 부유선별에 의한 탈묵과정을 보다 명확히 이해하기 위해서는 기포와 잉크입자 사이에 작용하는 힘의 계면화학적 측면 뿐만 아니라, 기포와 잉크입자의 충돌의 가능성을 고려하는 유체 역학적 측면도 함께 고려하는 것이 중요하다.

2.1. 유체역학적 측면

부유선별법에 적당한 입경은 10~100 μm이지만, 250 μm까지는 부유시킬 수 있다고 보고된 바 있다. 세척법과 비교

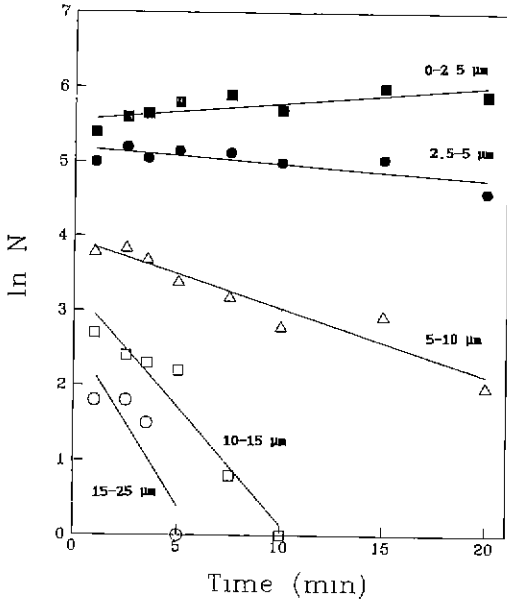


Fig. 3. The relation of the number of residual ink particles and the flotation time.

해 볼 때, 적용할 수 있는 입경 범위가 넓은 것이 부유선별법의 특징 중 하나이지만, 적정 범위보다 훨씬 크거나 작은 입자의 경우에는 분리가 어렵게 되는데, 이러한 과정에는 계면화학적인 측면 뿐만 아니라 수력학적인 측면이 깊이 관여한다고 간주되어 진다.

잉크입자는 충돌에 의해 기포와 부착할 수 있게 되는데, 수력학적 효과에 의해 기포가 클수록, 입자가 작을수록 충돌이 일어나기 힘들다는 연구결과가 보고되었고, 이러한 사실은 부유선별의 속도상수 k 로써 설명된다.

탈잉크에 대한 속도론적인 검토에서, 부유선별 실험동안 시간(t)에 따른 잔류잉크수의 대수($\ln N$)를 그래프로 표시하면 직선이 되고(Fig 3), 다음 식(2)와 같은 1차 반응식에 따른다는 결과가 보고된 바 있다.⁸⁾ 또한, (2)의 식은 (3)과 같은 적분식으로도 표현할 수 있다.

$$\frac{dN}{dt} = -kN \quad (2)$$

$$\ln N = -kt + \ln N_0 \quad (3)$$

- t : reaction time (min)
- k : flotation rate constant (min^{-1})
- N_0 : number of ink particles at $t=0$
- N : number of ink particles at t

Fig. 3으로부터, 직선의 기울기에 해당하는 부상속도상수

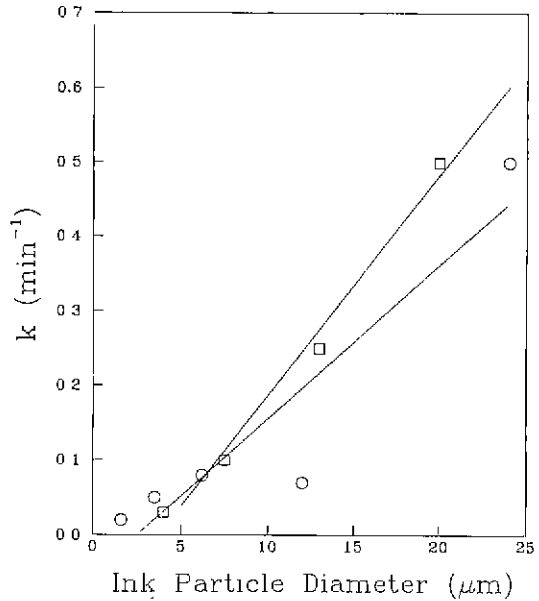


Fig. 4. First-order rate constant for the flotation of ink particles of different sizes (\square ; model ink dispersion, \circ ; waste paper pulp).

(k)는 잉크입경이 클수록 그 값이 증가하고, $2.5 \mu\text{m}$ 이하의 미세한 잉크입자는 쉽게 제거할 수 없다는 것을 명확히 알 수 있다.

또한, 부상속도상수는 정류상태에서 다음과 같은 식으로 표현된다는 실험결과가 도출된 바 있다⁹⁾

$$k = \left(\frac{9}{4} + \frac{2Re}{5} \right) \frac{D_p^2}{D_b^3} V_g P_a \quad (4)$$

- Re : Reynolds number of the bubble
- D_p : particle diameter (cm)
- D_b : bubble diameter (cm)
- V_g : superficial gas flow rate (cm/min)
- P_a : probability of bubble-particle adhesion

식(4)로부터 k 는 P_a 가 일정하면, 입자직경의 제곱에 비례하고 기포직경의 세제곱에 역비례함을 알 수 있다. 이러한 사실은 잉크의 입자가 커질수록 k 값이 증가하는 관계를 도시한 Fig. 4와,⁸⁾ 기포직경이 커짐에 따라 k 값이 감소하는 현상을 나타낸 Fig. 5의 자료⁹⁾로부터 확인할 수 있다.

앞서 언급한 바와 같이 식(4)에서 부착의 가능성 P_a 를 제외한 D_p 와 D_b 의 항이 충돌의 가능성 P_c 와 관련되므로, 잉크 입경이 클수록 또한 기포직경이 작을수록 양자간의 충돌이 용이하다고 해석할 수 있고, 이러한 관계는 다음과 같은 식 (5)로 표현할 수 있다.

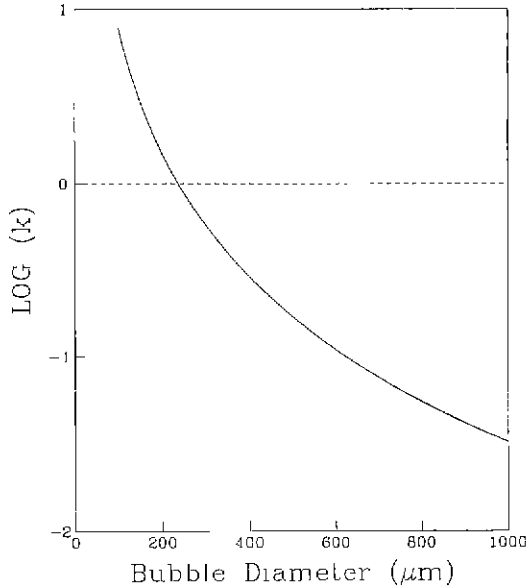


Fig. 5. Predicted relationship for flotation rate constant (k) versus bubble size (D_b) under quiescent conditions. The plot shows the case when $P=0.05$.

$$P_c \propto \frac{D_p}{D_b} \quad (5)$$

이상의 부상속도상수에 관한 연구 결과로부터, 초미립의 잉크입자는 부유선별법에 의해서 쉽게 제거할 수 없음을 알 수 있다. 이처럼 부유선별법에서 미세입자의 제거효율이 낮은 이유에 대한 보다 명확한 고찰을 위해서는, 상승하는 기포의 주위에서 기포와 함께 이동하고 있는 물에 의한 수력학적 효과를 이해하는 것이 중요하다. 이러한 수력학적 효과는 확산경계층설¹⁰⁾로써 설명된다. Fig. 6은 물 속에서 상승하는 기포를 나타낸 것으로, 기포를 둘러싼 3층 모델을 보여주고 있다. 이 모델에 의하면, 기포의 가장 바깥층의 제 1층은 표면력에 관여하지 않는 층이므로 입자는 수력학적 인 법칙에 따라 운동하게 되고, 제2층은 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ cm 정도 두께의 확산경계층에 해당한다. 또한, 가장 안쪽에서 기포에 접촉하고 있는 제3층은 전기적 이중층으로서 입자의 흡착작용을 갖는 층이라고 설명하고 있다. 따라서, 잉크입자가 한계입자경보다도 작아지게 되면, 잉크입자는 유선을 따라 흘러가고 제1층에서 제2층으로 들이갈 수 없게 되므로 흡착에 이르지 못하게 된다고 해석할 수 있다. 이러한 한계 입자 크기는 기포직경의 영향을 받는다고 알려져 있으므로, 입자와 기포의 충돌 가능성에 있어서 기포의 크기도 중요하다 하는 것을 알 수 있다. 실제로 미세입자의 제거를 위해서

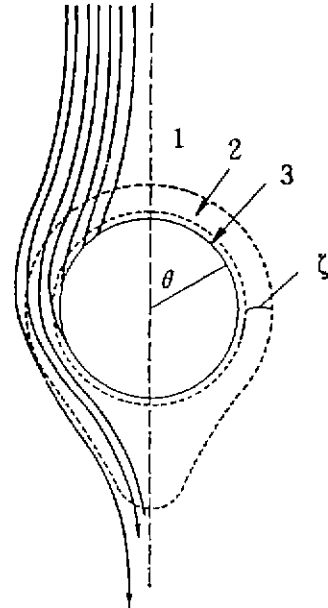


Fig. 6. Three layer trajectories around the air bubble which rises through the liquid.

는 적절한 크기의 미세기포가 필요하다고 알려져 있는데, 제거할 잉크입자 보다 약 5배 정도 크기의 기포가 적절하다고 보고된 바 있다.¹¹⁾

이상의 수력학적 측면에서의 고찰을 통해서 입자가 쓸수록 기포와의 충돌의 가능성이 증가함을 알 수 있지만, 적정 범위를 벗어난 큰 잉크입자의 경우에도 역시 부유선별에 의해 제거하기 어렵다고 간주되어 진다. 기포에 부착한 잉크입자가 액체 내를 상승할 때, 중력과 점성력이 작용하게 되는데, 이 때 잉크입자와 기포의 복합체는 이러한 힘에 의해 분리되지 않도록 충분히 강하게 결합하고 있어야 한다. 즉, 입자의 부상이 가능하기 위해서는 입자의 수직방향에 작용하는 메커니즘의 총상승인력이 그 중력보다 커야 한다. 따라서, 크고 무거운 입자의 경우에는 이처럼 기포에 의한 부상이 어렵기 때문에 부유선별 효율이 낮아지게 된다고 해석할 수 있다. 부상시킬 수 있는 잉크입자의 최대크기는 식(6)에 의해 계산할 수 있고, 실제로 이러한 입자경보다 큰 입자는 부유선별법으로 제거하기가 어렵다는 사실이 보고된 바 있다.¹⁰⁾

$$DH = \gamma_c \cos\theta / (d_p - d_w)g \quad (6)$$

D : diameter of ink particle (cm)

H : height of ink film (cm)

γ_c : liquid surface tension (dyne/cm)

- θ : contact angle (degree)
- d_p : density of ink particle (g/cm^3)
- d_w : density of water (g/cm^3)
- g : acceleration of gravity (m/sec^2)

3. 부유선별의 실제

부유선별에 의한 탈묵공정에 있어서 잉크의 분리 효율에 영향을 미치는 인자로는 처리할 시료의 농도, 처리온도, pH, 체류시간, 첨가되는 약품의 종류와 농도 등 여러 가지가 있다.¹³⁻¹⁵⁾ 따라서, 실제 작업면에서 가장 중요한 것은 이러한 영향인자들을 적절히 조절하여 미세한 잉크입자의 형성을 최소화하고, 적절한 크기의 미세기포를 적량 발생시켜서 잉크 입자와 효율적으로 부착할 수 있도록 하는 것이다

미세입자의 형성을 최소화하기 위해서 pulper에 강한 분산제 대신 완화된 적당량의 분산제를 첨가함으로써, 섬유로부터 이탈된 잉크입자가 과도하게 분산되지 않도록 할 수 있다는 실험결과가 보고되었다 또한, pulper나 부상셀에 포집제를 첨가하여 미세한 입자들을 응집시킴으로써 부유선별의 효율이 보다 증대된다고 밝혀진 바 있다.¹⁰⁾

그 이외에도, 부유선별에 의해 제거될 수 있는 잉크입경은 기포경의 영향을 받으므로, 적절한 크기의 기포를 발생시킬 수 있는 부상셀의 설계가 중요하게 고려되고 있다. 그 대표적인 예로서, 미세입자들의 제거를 위한 미기포 발생을 극대화시킬수 있도록 Lineacell과 같은 고성능 부상셀 (highly efficient flotation cell)이 고안되었다(Fig.7)^{3, 20)} 이 부상셀은 기포발생부, 혼합부, 분리부의 세 부분으로 구성되어 있다. 포기부에서는 정량의 공기가 유입되며, 혼합부에서는 잉크입자와 기포의 부착이 일어나므로 부상셀에서 가장 중요한 부분이라고 할 수 있다. 이러한 혼합부의 설계는, 잉크입자와 기포는 강하게 충돌할수록 더 잘 부착하고, 그 충돌의 기능성은 잉크입경이 클수록, 기포경이 작을수록 커진다는 이론에 기초한다 그러나, 매우 작은 기포의 형성은 섬유손실을 증가시키는 경향이 있다고 보고된 바 있는데, 일반적으로 최소 기포의 크기는 직경 0.3-0.5 mm 정도로 간주되고 있다.¹⁶⁾ 따라서, 미세입자의 제거를 위해서는 적절한 크기의 미세기포가 필요함을 알 수 있고, 이러한 미세기포의 형성을 최대화하기 위해서는 포기부와 분리부의 설계를 바꾸는 등의 기계적인 조절을 생각할 수 있을 것이다.

분리부는 잉크입자와 기포의 복합체가 표면으로 가능한 한 빨리 부상하고 그 잉크거품이 stock표면에서 섬유의 손실을 최소화하면서 제거될 수 있도록 설계되어야 한다. Lineacell에서는 진공 시스템에 의해 잉크거품만이 섬유 표

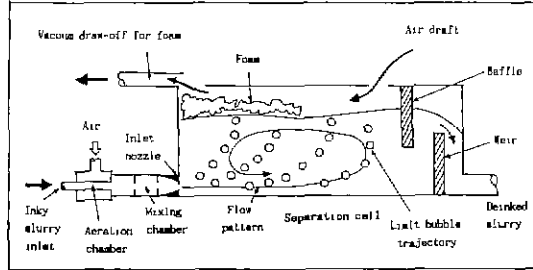


Fig. 7. Diagram of the Lineacell flotation unit.

면으로부터 제거되므로 기존의 부상셀보다 섬유손실이 적다고 알려져 있다.

4. 결 론

부유선별에 의한 탈묵공정은 수중에서 상승하는 기포의 포집에 의해 잉크입자가 제거되는 공정이므로, 잉크입자가 기포에 효과적으로 부착될 수 있는지의 여부가 중요하다. 이러한 잉크입자와 기포와의 부착은 일차적으로 충돌에 의한 것인데, 이 때 충돌의 기능성은 잉크입경이 클수록, 기포경이 작을수록 커지고, 주로 수력학적 요인의 지배를 받게 된다. 즉, 미세한 잉크입자의 경우에는 기포와의 충돌이 어렵게 됨을 알 수 있는데, 그 이유는 미세입자는 기포주위의 수충유선을 따라 흘러가 버리는 경향이 있기 때문이다 그러므로, 부유선별법에서 미세입자의 제거효율이 낮아지게 된다. 또한, 거대한 잉크입자의 경우에는 기포와 부착하여 수중에서 부상셀의 표면으로 부상하는 과정에서 중력과 점성력 등의 영향을 크게 받게 되므로, 부유선별에 의한 제거가 어렵다고 간주되어 진다

결론적으로, 부유선별법에서 그 분리효율을 향상시키기 위해서는 계면화학적 관점 뿐만 아니라, 입자경과 기포경의 조절을 포함한 수력학적 관점에서의 조건선정도 중요하다고 할 수 있다. 따라서, 부유선별의 실제 공정에서는 처리할 시료의 농도, 처리온도, pH, 체류시간, 첨가되는 약품의 종류 및 농도 등의 여러가지 요소를 적절하게 조절하여, 미세한 잉크입자의 형성을 최소화하고, 적절한 크기의 기포를 적량 발생시킴으로써 잉크입자를 효율적으로 부착할 수 있도록 하는 것이 가장 중요하다.

참고문헌

1. Andy Harrison : "Flotation deinking is critical in unit process method of deinking". Pulp & Paper, March, 60-

- 65(1989).
2. Douglas R.Crow and Ronald F.Secor : "The ten steps of deinking", *Tappi J.*, 70(7), 101-106(1987).
 3. Wayne F.Carr : "New trends in deinking technology-Removing difficult inks from wastepaper", *Tappi J.*, 74(2), 127-132(1991).
 4. Michael A.McCool and Luigi Silveri "Removal of specks and nondispersed ink from a deinking furnish", *Tappi J.*, 70(11), 75-79(1987).
 5. L. Marchildon, M Lapointe, and B Chabot : "The influence of particulate size in flotation deinking of news print", *Pulp & Paper Canada*, 90(4), 90-95(1989)
 6. Larsson A, Stenius P., and Odberg L. : "Surface chemistry in flotation deinking-part 2", *Svensk Papperstidning*, 87(18), R165-R169(1984).
 7. Derjaguin B.V., Dukhan S.S. and Rulyov N.N : "Kinetic Theory of Flotation of Small Particles", *Surface and Colloid Science*, ed. Matijevic E. and Good R., Plenum Press, New York(1984)
 8. Larsson A., Stenius P., and Odberg L. : "Surface chemistry in flotation deinking-part 1", *Svensk Papperstidning*, 87(18), R158-R164(1984).
 9. J. Leja and G.W. Poling . Preprint International Mineral Processing Congress, London, April(1960)
 10. 古紙再生處理にかかる基礎的技術に関する調査報告書, 第1分冊, 57-79(1992)
 11. Jose Miguel Zabala and Michael A. McCool : "Deinking at Papelera Peninsular and the philosophy of deinking system design", *Tappi J.*, 71(8), 62-68(1988).
 12. R.W.J. McKinney : "Wastepaper preparation and contamination removal". *Technology of paper recycling*, 1st Edn., 56-58, Blackie Academic and Professional, London (1995).
 13. R.M. Vidotti, D.S. Johnstone, and E.V. Thompson : "Comparison of bench scale and pilot plant flotation of photocopied office wastepaper", *TAPPI Pulping Conference*, TAPPI Press, 643-652(1992).
 14. William K. Forester "Deinking of UV-cured inks", *Tappi J.*, 70(5), 127-130(1987)
 15. Larsson A., Stenius P., and Odberg L. : "Surface chemistry in flotation deinking-part 3". *Svensk Papperstidning*, 88(2), R2-R7(1985).
 16. R.W. Turvey : "Why do fibres float". 1st Research Forum on Recycling, Technical Section CPPA, 123-131(1991).
 17. H. Schulze : "The fundamentals of floatation deinking in comparison to mineral flotation". 1st Recycling Forum, Technical Section CPPA, 161-167(1991).