

浮遊選別法을 適用한 脫墨工程의 界面化學的 및 水力學的 原理(I) - 界面化學的 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(I)

Sun-Young Park and Dong-Su Kim

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

요 약

탈묵이란 재사용 가능한 고지의 섬유로부터 잉크를 제거하는 공정을 일컫는 것으로, 이 중 현재 가장 일반적으로 사용되는 것이 부유선별에 의한 탈묵 공정이다. 부유선별법에서 잉크는 여러 개의 독립된 단계들을 거쳐 제거되고 각 단계들은 다양한 메커니즘과 화학조건에 의존한다. 공정의 초기단계로서인 pulping 과정에서, 잉크막은 섬유 표면으로부터 효과적으로 탈리되어 적절한 크기의 입자로 분산되어야 한다. 분산된 잉크입자들은 부선법에 의해 펄프로부터 제거될 수 있다. 이 과정에서 잉크입자의 부유선별이 가능하기 위해서는 몇가지 조건이 만족되어야 한다. 먼저, 잉크입자는 기포와 충돌해야 하는데, 이 단계는 잉크입자와 기포의 크기에 의존하고, 주로 수력학적 조건에 의해 지배된다. 다음 단계로서, 충돌한 잉크입자는 기포에 부착되어 안정한 복합체를 형성함으로써 표면으로 부상할 수 있어야 한다 이를 위해서는 표면에너지와 접촉각과 같은 화학적인 조건의 조절이 필요하다 결론적으로, 부유선별법에서 잉크의 효율적인 제거를 위해서는 화학적 조건과 수력학적 조건의 양측면에서의 적절한 고려가 필요하다고 할 수 있다.

ABSTRACT

Deinking is the process of removing ink from usable paper fibre and the most prominent deinking process is currently the flotation system The deinking process consists of a few distinct steps and each of these steps is dependent on a variety of mechanisms and chemical conditions. As an incipient step, the ink film must be efficiently removed from the fibre surface and dispersed into particles of suitable size during the pulping process. After dispersion, the ink particles can be removed from the pulp by flotation. In this step, several criteria must be fulfilled for a particle to be floated First, the particles must collide with the air bubbles. This step is governed by hydrodynamic conditions and depends on the sizes of particle and bubble. Next, the particles must attach to the air bubbles and rise through the liquid by forming a stable particle-bubble aggregate. For this to happen, the chemistry such as surface force and contact angle has to be controlled Therefore, it is important to consider both chemical and hydrodynamic conditions for a successful flotation in deinking process

1. 서 론

최근들어 폐지는 신문이나 위생종이 등의 원료로서 중요한 자리를 차지하고 있으며, 고지 재사용은 환경보존 및 자원 재활용의 측면에서 중요하므로 이에 대한 관심이 국내

외적으로 고조되고 있는 실정이다. 우리나라의 경우 고지회수율은 1992년도에 44%, 95년도에는 45%정도였고, 다가오는 2000년대에는 50%로 목표하고 있다.¹⁾ 고지재생필프를 이용할 때 백색도와 색상은 아주 중요한 요소가 되며 이러한 요구에 잘 부합되는 제지생산을 위해서는 인쇄잉크를

폐지로부터 제거하는 탈묵공정이 중요하다.

탈묵시스템은 독립된 여러개의 단위공정들로 구성되는데, 보통 다음과 같은 10가지의 기본단계들이 있다(Fig.1).²⁾ 하지만, 대부분의 탈묵 시스템들은 실제 운영에 있어서의 관리의 어려움과 경제성 등을 고려하여 이러한 10단계 중 몇 단계만을 적절한 순서로 조합하여 사용한다.

이러한 탈묵공정의 주요한 과정을 살펴보면, 초기 단계에서 폐지는 물과 함께 pulper에서 슬러리를 형성하고, 이러한 펄프 슬러리에 인쇄잉크를 종이 섬유로부터 이탈시켜 분산시키는 제면활성제가 첨가된다. 이와같은 과정을 거쳐 수중에 분산된 잉크입자들을 섬유로부터 분리하여 제거하는 방법으로는 세척법(washing)과 부유선별법(flotation)이 있는데, 현재 가장 일반적으로 사용되는 것이 부유선별법이다.³⁾ 부유선별법은 포집제(collector)의 도움으로 잉크입자를 기포에 부착시켜 부유선별하는 탈묵공정으로, 이러한 과정에서 잉크입자가 기포와 효과적으로 부착되기 위해서는 그 표면특성에 의한 계면화학적인 요소를 조절하는 것이 대단히 중요하다.

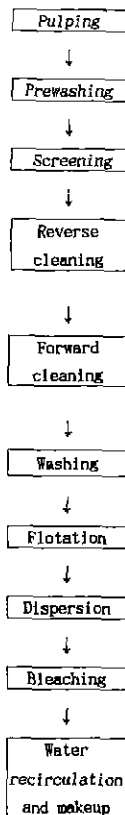


Fig. 1. Ten basic steps of deinking process.

또한, 부유선별법은 10~100 m의 입자제거에 적당하고, 이 범위에서는 입경이 클수록 부유선별의 효율이 향상된다. 이는 실험결과가 보고된 바 있는데,^{4,5)} 이와같이 잉크입자의 크기가 탈잉크 효율에 미치는 영향을 이해하기 위해서는 수력학적 요인도 함께 고려해야 한다. 그러므로, 본 연구에서는 부선법에 의한 탈잉크 원리를 계면화학적 및 수력학적 측면의 양면에서 고찰해 보았다.

2. 부유선별법에서의 탈묵 메커니즘

부유선별법에 의해 잉크가 제거되기 위해서는 먼저 잉크막이 섬유 표면으로부터 탈리되어 적절한 크기의 입자들로 분산된 후, 잉크입자들이 기포에 효과적으로 부착되어 부상셀의 표면으로 부상할 수 있어야 하는데, 이를 위해서 포집제와 같은 화학약품의 도움이 필요하다. 포집제로서 가장 일반적으로 사용되는 것은 비누(soap)와 같은 지방산형 계면활성제인데(Fig. 2), 이는 분자중에 친수기와 소수기를 갖고 있으며, 수중에서 칼슘이온과 결합하여 지방산 칼슘염을 형성하여 입자표면에 부착함으로써 그 표면을 소수화시킨다고 알려져 있다.⁶⁾

부유선별법에서 이러한 지방산 칼슘염의 포집작용을 설명하기 위해 여러 모델들이 제안된 바 있다(Fig.3).^{7,8)} 이들 가운데에서, Larsson에 의해 제안된 모델(Fig.3(e))이 정량적 실험에 뒷받침되어 있고, 지방산형의 탈묵에 대해서는 가장 신뢰도가 높은 것으로 간주되고 있다.⁹⁾ 이 모델에 의하면, 분산된 잉크입자의 표면은 수중에 존재하는 지방산에 의해 둘러싸이게 되는데, 이 때 잉크입자의 표면은 흡착한 지방산에 의해 절대값이 큰 음의 zeta-potential(ζ -potential)

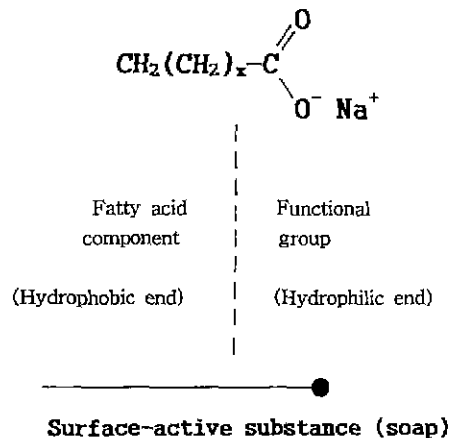


Fig. 2. soap as a collector on deinking process by flotation.

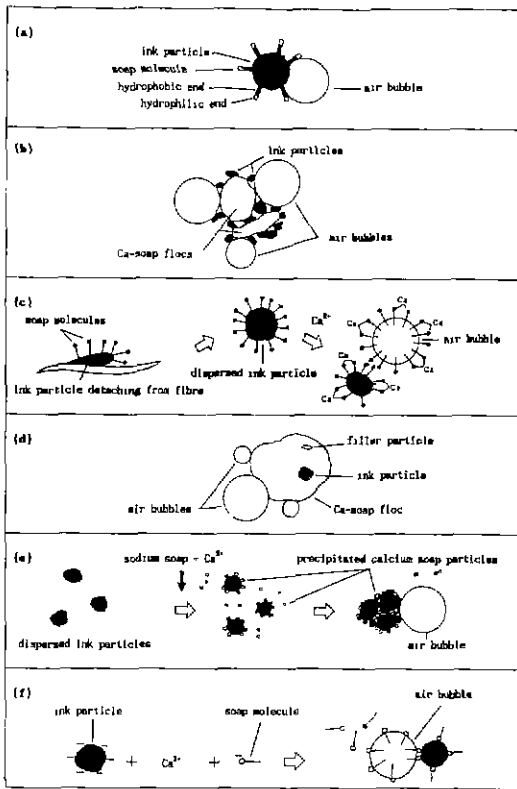


Fig. 3. Several models for the collecting mechanism of calcium soap: (a) Redrawn after Schweizer and Ortner *et al.*, Note that calcium ions are not involved in this mechanism. (b) Redrawn after Bechstein and Unger, (c) Redrawn after Ortner, (d) Redrawn after Fischer, (e) Redrawn after Larsson *et al.*, (f) Redrawn after Hornfeck.

을 갖고, 수중에서 정전기적 반발력에 의해 안정하게 분산하고 있다. 여기에 염화칼슘 등의 다가이온(multivalence)을 첨가하면, 양전하의 유입으로 인해 입자표면의 ζ -potential은 일부 중화되지만 floc생성을 위해서는 아직도 높은 상태에 있다고 본다. 한편, 잉크입자에 흡착하지 않고 수중에 분산하고 있는 지방산은 다가이온의 첨가에 의해 불용성 지방산염으로 변하고, 물에 녹지않고 석출한 지방산염이 잉크입자를 덮게 되는데, 이로인해 입자의 ζ -potential이 더욱 내려가며, 입자간의 반발력이 감소하여 응집을 일으킨다. 또한 표면이 소수성 지방산염으로 덮이기 때문에 응집된 잉크입자가 기포에 부착하여 결국은 물의 표면으로 부상하게 된다고 설명하고 있다.

결론적으로, 부유선별법에서 잉크입자가 제거되기 위해서는 적절한 입경 범위의 잉크입자가 필요하고, 잉크입자의

표면이 소수화되어 기포와 효과적으로 부착할 수 있어야 하는데, 이를 위해서 지방산 칼슘염과 같은 포집제가 사용된다고 해석할 수 있다. 또한, 이와 같은 탈묵 메커니즘은 잉크입자들간의 응집과 분산상태를 결정하는데 관여하고 있는 힘과, 잉크입자가 기포에 부착하는 과정에서 작용하는 계면화학적 힘에 기초하고 있으므로, 이러한 내용을 중심으로 부유선별법에 의한 탈묵의 원리를 고찰해 보는 것이 대단히 중요하다고 할 수 있다.

3. 부유선별의 이론

3.1. 잉크 입자간의 상호작용

부유선별법에서 잉크입자의 크기는 매우 중요한 영향인자로서, 그 입경이 클수록 부유선별의 효율이 향상된다는 사실을 고려해 볼 때, 분산된 잉크입자가 기포에 충돌할 수 있도록 적절한 크기로 응집되어야 함을 알 수 있다. 따라서, 잉크입자의 분산, 응집의 과정에 관여하는 입자간의 힘에 대해 고찰해 보는 것이 매우 중요하다

콜로이드 입자의 분산상태에 관한 고전적인 DLVO이론에 의하면, 입자간의 van der Waals력에 해당하는 인력 V_A 는 (1)식으로 주어지며, 입자주위의 정전기적 이중층의 전위에 의한 반발력 V_R 은 (2)식으로 주어진다. 이 두 요소를 합한 V_T 가 2개의 입자를 접근시켰을 때 입자간에 작용하는 순수한 에너지와 입자간 거리의 관계를 주는 고전적인 일반식으로 알려져 있다.¹⁰⁻¹²⁾ 그리고 이러한 식의 내용은 Fig. 4와 같은 그림으로 표현된다.

$$V_A = \frac{Aa_1a_2}{6(a_1+a_2)H_0} \quad (a_1, a_2 \gg H_D) \quad (1)$$

$$V_R = \frac{a_1a_2\psi_0^2\epsilon}{a_1+a_2} \ln 1 + \exp(-\chi H_0) \quad (2)$$

$$V_T = V_A + V_R \quad (3)$$

A : Hamaker constant

ψ_0 : Surface potential of ink particle(mV)

α_1, α_2 : Diameter of ink particle(μm)

H_0 : Distance between ink particles(μm)

ϵ : Dielectric constant of solution

χ : Debye-Huckel parameter

Fig. 4로부터 응집된 입자의 덩어리가 서로 분리되어 안정한 콜로이드의 분산상태로 되기 위해서는 에너지 장벽 ($V_{max}+V_{min}$)을 넘어야 함을 알 수 있다. 반면에, 분산상태의 입자들이 응집되기 위해서는 V_{max} 의 응집을 위한 에너지 장

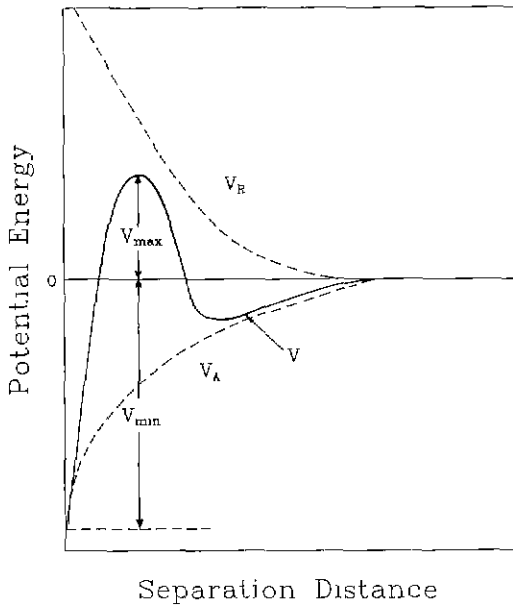


Fig. 4. Net force between colloidal particles of like charge, as a function of separation distance.

벽을 넘어야 함을 알 수 있는데, 이는 입자간의 반발력 V_R 을 최소화시켜야함을 의미한다.

식(2)로부터 입자간의 반발력의 크기는 입자의 표면전위에 의한 것이므로, 그 크기는 입자표면으로부터의 거리가 멀어짐에 따라 지수적으로 감소함을 알 수 있다 또, 이 식에서 χ 는 Debye-Hückel parameter로서 다음과 같이 정의되는데, 이는 이온강도(I)의 개념을 포함하고 있으므로, 분산액의 이온강도 역시 입자간의 반발력이 감소되는 정도에 영향을 주는 인자임을 알 수 있다¹³⁾

$$\chi = \sqrt{(2e^2 \sum n_i z_i^2 / \epsilon kT)} \quad (4)$$

- e : protonic charge
- ϵ permittivity
- k . Boltzmann's constant
- T : temperature ($^{\circ}C$)

$$I = \frac{1}{2} \sum n_i z_i^2 \quad (5)$$

- I : ionic strength
- n_i : molar concentration of ions (mol)
- z_i : charge of ions

결론적으로, 부유선별법에서 분산상태의 잉크입자가 기포에 효과적으로 충돌할 수 있으려면 적절한 크기로 응집되어야 하는데, 이를 위해서는 잉크입자의 표면전위를 저하시키고, 분산액의 이온강도를 높이는 화학적인 조절을 통해 입

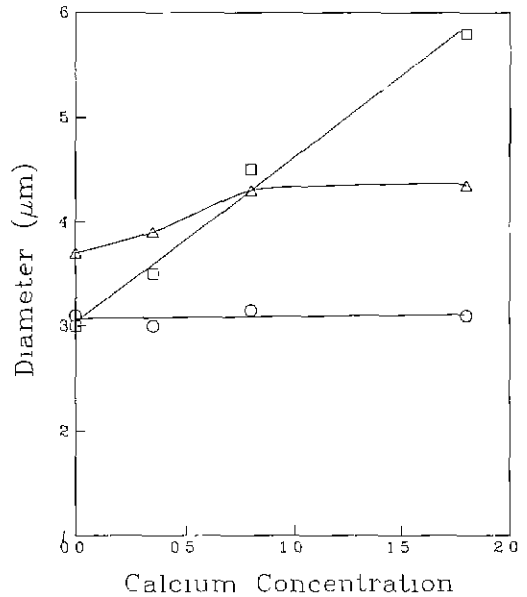


Fig. 5. Ink particle mean diameter after the slushing as a function of the calcium concentration in the pulper (○; 0.0% stearate. △; 0.5% stearate, □; 1.0% stearate)

자간의 반발력을 최소화시키는 것이 중요하다. 입자의 표면전위(ζ -potential)는, 반대전하를 가진 다가이온의 첨가에 의해 잉크입자의 ζ -potential이 중화되면서 낮아지고 잉크입자가 응집하기 쉽게 된다는 실험결과가 발표된 바 있다.¹⁴⁾ 따라서, 부유선별법에서는 pulper나 부선셀에 칼슘염과 같은 다가이온을 비누와 함께 첨가함으로써 잉크입자의 응집을 유도할 수 있는데, 이러한 사실은 비누의 첨가율이 큰 만큼, 또한 칼슘이온의 첨가량이 증가됨에 따라 잉크입경이 크게 되는 현상을 나타낸 Fig 5의 자료에서 확인할 수 있다.⁵⁾ 이 그림으로부터 각각의 인자들은 단독 성분으로서도 중요한 역할을 할 뿐만 아니라, 공존시 상승작용을 나타냄을 알 수 있다 즉, 비누와 같은 지방산염의 수용액은 칼슘의 첨가에 의해 지방산 칼슘염을 형성하여 잉크입자 표면에 침전함으로써 그 표면전위를 저하시키는데, 이로인해 잉크입자들간의 반발력이 감소되어 응집을 유도하는 것으로 해석할 수 있다.

한편, 강한 소수성 고체의 경우에는 응집을 위한 에너지 장벽이 DLVO이론에서 제시한 식(3)에 의해 계산된 값보다 실험에서 측정된 값이 훨씬 크다는 것이 알려져 있고, 따라서 소수성의 상호 에너지(hydrophobic interaction energy)와 같은 부가에너지의 형태를 고려해 주어야 한다는 이론이 제시되었다.¹⁵⁾ 이 hydrophobic interaction energy(V_H)에 대한

식은 물의 접촉각 측정으로 결정되는 흡착작용의 비분산 성분(nondispersion component of adhesion; W_a^{nd})의 함수로써 유도되어 진다.

$$V_T = V_R + V_A + V_H \quad (6)$$

$$V_H = -V_m \exp\{-b(W_a^{nd} - c)\} \quad (7)$$

V_m : maximum value of hydrophobic interaction energy
 W_a^{nd} : nondispersion component of work of adhesion
 b, c : constants

그러나 V_H 의 향이 보편적으로 적용되는지의 여부는 불명확한 것으로, V_H 의 3개의 변수 중 V_m 과 c 는 모든 물질에 공통적으로 적용된다고 생각되지만, 변수 b 는 다른 물질에 적용될 지도 모른다고 간주되고 있기 때문이다.

3.2. 잉크입자와 기포간의 상호작용

부유선별법은 수중에서 상승하는 기포의 포집에 의해 잉크입자가 제거되는 공정이므로, 잉크입자가 기포에 효과적으로 부착될 수 있는지의 여부가 가장 중요하게 고려되어야 할 사항이다. 이러한 부착이 가능하기 위해서는 먼저 잉크입자들이 기포와 충돌해야 하고, 충돌한 잉크입자의 표면과 기포표면 사이에 존재하는 얇은 액체막이 파열되어야 한다. 이를 위해서는 잉크입자와 기포간의 반발력이 최소화되어야 하며, 잉크입자의 표면이 기포에 부착될 수 있도록 충분히 소수성이어야 한다. 이러한 과정을 거쳐 형성된 잉크입자와 기포의 복합체는 부상셀에서의 높은 전단력과, 수중을 부상하는 동안 그 복합체에 작용하는 중력과 점성력 등을 견딜 수 있도록 충분히 강하게 결합하고 있어야 한다. 결국, 부착의 과정은 다음과 같은 가능성(probability)의 개념으로 표현될 수 있다고 알려져 있다.¹⁶⁾

$$P = P_c \cdot P_a \cdot P_s \quad (8)$$

P : the probability of particle capture by an air bubble
 P_c : the probability of collision
 P_a : the probability of attachment
 P_s : the probability of formation of a stable particle-bubble aggregate

식(8)은 부상셀에서 잉크입자가 기포에 의해 효과적으로 제거되기 위해서는 잉크입자와 기포간의 충돌, 부착, 그리고 그 결합의 정도가 모두 영향인자로서 중요함을 보여준다. 이들 가운데에서, P_c 와 P_s 는 표면전위와 접촉각과 같은 입자와 기포간의 계면화학적 조건에 의한 인자이고, P_a 는 입자와 기포의 크기에 의존하는 인자로서, 주로 수력학적

조건에 지배된다. 따라서, 부유선별에 의한 탈묵과정은 원리적으로는 기포와 잉크입자 사이에 작용하는 힘의 계면화학적 측면과 기포와 잉크입자의 접근 빈도를 고려하는 유체 역학적 측면을 포함한 매우 복잡한 과정이라고 할 수 있고, 따라서 두가지 측면에서 부유선별의 원리를 고찰하는 것이 중요하다.

3.3. 계면화학적 측면

부유선별법에 의한 탈묵공정은 기포에 의한 잉크입자의 부상 분리가 기본 작용이므로, 잉크입자와 기포의 부착력을 강화하고, 잉크 표면의 소수성을 향상시키는 등의 계면화학적 조절을 통해 잉크입자가 부상하기 쉽게 하는 것이 그 분리효율 개선의 중요한 요점이라고 할 수 있다.

잉크입자가 기포와 부착할 수 있기 위해서는 부착과정 동안의 자유에너지 변화가 다음의 조건을 만족해야 한다고 알려져 있다.¹⁶⁾

$$\Delta G = G_2 - G_1 < 0 \quad (9)$$

G_1 : Gibbs free energy of the system before the attachment
 G_2 : Gibbs free energy of the system after the attachment

또한, 이러한 자유에너지 개념을 Young's equation과 결합하면 다음식으로 표현할 수 있다.

$$\Delta G = \gamma_w (\cos\theta - 1) \quad (10)$$

γ_w : liquid surface tension (dyne/cm)
 θ : contact angle (degree)

식(10)으로부터 $\theta=0$ 이면 $\Delta G=0$ 이고, $\theta>0$ 이면 $\Delta G<0$ 이 됨을 알 수 있다. 즉, $\theta>0$ 이면 ΔG 가 음의 값이 되어 식(9)의 열역학적 조건을 만족시키므로 입자가 기포에 부착할 수 있게 된다. 또한, 접촉각이 클수록 ΔG 의 값은 더 큰 음의 값을 갖게 되므로 부상의 가능성은 그만큼 더 증가하게 된다고 해석할 수 있다. 하지만, 이러한 부착을 위한 열역학적 조건을 나타내는 식은 입자가 기포에 부착하기 전과 부착한 후의 상태만을 고려한 것이고, 그 중간단계를 고려하지 않고 있다. 따라서, 부착과정의 중간단계로서 충돌한 입자와 기포를 분리하고 있는 액체막의 파열단계를 고려해 줄 필요가 있다.

부착하기 위해서 충돌한 입자표면과 기포 사이에는 액체막이 존재하여 양자를 분리시키고 있는데, 이 막의 두께가 얇아져서 파열됨으로써 입자는 기포와 부착할 수 있게 된다고 알려져 있다. 이러한 액체막에서, 단위액체기둥의 자유에너지는 다음의 식으로 주어진다.¹⁶⁾

$$G^s(h) = \gamma_{sl} + \gamma_{lv}(h) \quad (11)$$

γ_{sl} : solid/liquid interfacial energy (dyne/cm)

γ_{lv} : liquid surface tension (dyne/cm)

h : thickness of the film (cm)

식(11)로부터 G^s 는 액체막의 두께(h)의 함수임을 알 수 있는데, 이는 $h < h_0$ 의 범위에 해당하는 액체막 두께에서는 γ_{lv} 이 h 의 함수라고 알려져 있기 때문이다. 여기에서 h_0 는 잉크입자/액체 계면과 기포/액체 계면을 가로질러 작용하는 표면력의 범위에 해당하는 값이다. 따라서, h_0 와 같거나 그보다 두꺼운 두께의 액체막의 자유에너지는 다음과 같은 값으로 나타낼 수 있다.

$$G_{\infty}^s = \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \quad (12)$$

액체막의 두께가 h_0 보다 작은 범위에서는 두께가 감소됨에 따라 액체막의 자유에너지는 식(12)의 값으로부터 벗어나는 양상을 보인다고 알려져 있다. 즉, 액체막의 두께가 감소함에 따라 액체막의 자유에너지는 식(12)의 값보다 증가하거나 또는 감소하는 방향으로 변하게 된다. 이러한 액체막의 두께에 따른 자유에너지의 변화에 해당하는 값은 다음 식(13)의 분리압(Derjaguin's disjoining pressure; $\Pi(h)$)으로서 정의된다.¹⁵⁾

$$\Pi(h) = -\frac{dG^s}{dh} \quad (13)$$

결론적으로, 분리압의 값이 양이면 잉크입자/액체의 계면과 기포/액체의 계면 사이에 존재하는 액체막의 두께가 감소됨에 따라 자유에너지가 증가하므로 그 액체막은 매우 안정하여 파열되지 않고, 이러한 상태에서는 계면간의 반발력이 작용한다고 해석할 수 있다. 반면에, 분리압의 값이 음이면 불안정한 상태의 액체막이 형성되어, 즉시 파열되므로 계면간의 인력이 작용함을 의미하게 된다. 즉, 액체막의 두께가 감소되다가 그 분리압의 값이 양에서 음으로 되는 순간에 잉크입자와 기포를 분리하고 있던 액체막은 파열되고, 잉크입자와 기포의 부착이 이루어지게 된다.

이처럼 잉크입자와 기포사이의 액체막이 파열되어 잉크입자가 기포에 부착하기 위해서는 안정한 상태로 존재하는 액체막의 두께를 감소시키는 것이 중요함을 알 수 있는데, 이를 위해서는 표면전위에 의한 입자와 기포간의 반발력이 최소화되어야 한다. 기포와 잉크입자 사이에 작용하는 계면화학적 힘은 입자 사이에 작용하는 힘과 같이 간주되므로, 입자와 기포의 표면전위를 저하시킴으로써 양자간의 반발력을 감소시킬 수 있다고 해석할 수 있는데,

이를 위해서 지방산 칼슘염과 같은 포집제가 필요함은 상기한 바 있다. 이러한 포집제의 도움으로 기포와 잉크입자간의 반발력이 감소되면 계면을 분리하고 있던 액체막이 파열됨으로써 입자가 기포에 부착할 수 있게 된다 이와 같이 부착한 잉크입자와 기포의 복합체는 수중에서 부상셀의 표면으로 부상하게 되는데, 이 때 중력과 점성력 그리고 부상셀의 기계적 전단력 등의 힘이 작용하게 되므로, 이들의 결합은 이러한 힘에 의해 분리되지 않도록 충분히 강하지 않으면 안 된다.

잉크입자와 기포간의 결합의 강도는 접촉각의 개념으로 설명된다. Fig. 6은 접촉각의 크기에 따른 고체 표면에서 액체의 퍼짐(wetting)의 정도를 보여준다.¹⁷⁾ 이 그림에 의하면, (a)의 경우에는 접촉각이 커서 액체가 고체 표면으로 퍼지지 않음을 보여주고 있으나, (b)의 경우는 접촉각이 작아질수록 액체가 고체표면에 넓게 퍼짐을 알 수 있다. (c)의 경우는 접촉각이 0의 값을 가지므로 즉시 액체가 고체 표면을 적시는 것을 알 수 있다. 따라서, 잉크입자가 기포와 더 강하게 부착하기 위해서는 되도록이면 큰 접촉각이 필요함을 알 수 있다.

평형상태의 접촉각은 Young's equation에 의해 다음과 같이 정의된다.¹⁸⁾

$$\cos\theta = (\gamma_{sv} - \gamma_{sl})/\gamma_{lv} \quad (14)$$

θ : equilibrium contact angle (degree)

γ_{sv} : solid/vapor interfacial energy (dyne/cm)

γ_{sl} : solid/liquid interfacial energy (dyne/cm)

γ_{lv} : liquid surface tension (dyne/cm)

식(14)는, 접촉각을 크게하기 위해서는 $(\gamma_{sv} - \gamma_{sl})$ 의 값이 작아야 하고, 액체의 표면장력(γ_{lv})은 가능한 한 큰 값을 가져야 함을 시사하고 있다. $(\gamma_{sv} - \gamma_{sl})$ 의 값은 임계습윤장력(critical wetting tension)이라고 하며 고체의 표면에너지(solid surface energy)에 해당하는 값이라고 간주되고 있다. 앞서 언급한 바와 같이, 고체 표면에너지를 최소화하기 위해서 포집제가 사용되는데, 이것은 고체 표면에 흡착하여 표면에너지를 낮추는 효과가 있으므로, 식(14)에 의해 접촉각이 크게 되어 기포와 더 강한 결합체를 형성할 수 있도록 한다고 해석되어 진다.

접촉각을 크게하기 위한 또 다른 요소로서 액체의 표면장력(γ_{lv})을 최대화하는 것을 고려할 수 있는데, 액체의 표면장력은 온도의 역함수라고 알려져 있으므로 탈목과정에서 액체의 온도를 낮게 해주면 높은 표면장력을 유도할 수 있다.¹⁹⁾

이상의 내용을 종합해보면, 입자가 부상할 수 있기 위해서는 기포와 효과적으로 부착하여 단단한 결합체를 형성함

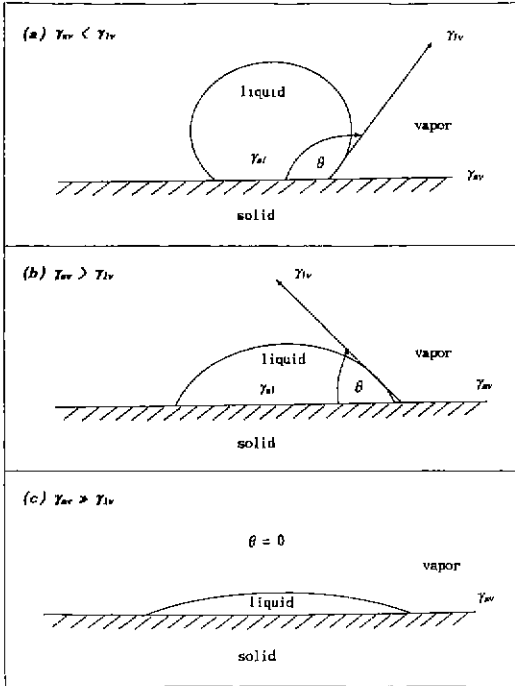


Fig. 6. Wetting of surfaces with different surface energies. (a) Critical surface tension of solid less than liquid surface tension-no wetting. (b) Critical surface tension greater than liquid surface tension. (c) Critical surface tension much greater than liquid surface tension-spontaneous wetting.

으로써 수중에서 부상셀의 표면으로 상승해야 되는데, 이러한 과정에서 지방산형 계면활성제와 같은 포집제를 첨가함으로써 표면전위에 의한 잉크입자와 기포간의 반발력을 최소화하고, 입자표면을 소수화시키는 등의 계면화학적인 조절이 중요함을 알 수 있다.

4. 결 론

부유선별에 의한 탈묵공정은 펄프 섬유로부터 탈리하여 분산되어 있는 잉크입자들이 기포와 충돌하여 얼마나 잘 부착하는가가 중요한 핵심이 되는데, 충돌한 잉크입자와 기포는 그 계면사이에 존재하여 양자를 분리하고 있는 액체막의 두께를 감소시켜 파열시킴으로써 부착할 수 있게 된다 이와같은 잉크와 기포의 부착과정이 효율적으로 이루어지기 위해서 지방산형 계면활성제와 같은 포집제가 사용된다. 이러한 포집제는 수중의 칼슘이온과 반응하여 지방산 칼슘염을 형성하게 되고, 이것이 잉크입자의 표면에 부착하

여 표면전위를 낮춤으로써 입자간의 반발력을 감소시켜 응집을 유도한다. 따라서, 분산상태의 작은 입자들은 적정 농도의 포집제의 첨가로 인해 보다 큰 입자의 덩어리를 형성함으로써 기포와의 충돌이 용이해지므로, 부유선별의 효율이 향상될 수 있다. 또한, 잉크입자 표면에 흡착한 포집제에 의해 잉크입자의 표면전위가 저하되므로 기포와의 반발력이 감소되고, 동시에 잉크입자의 표면은 소수화되므로 기포와의 부착이 쉽게 된다.

결론적으로, 부유선별법에서 잉크입자가 부상할 수 있기 위해서는 기포와 효과적으로 부착하여 단단한 결합체를 형성함으로써 수중에서 부상셀의 표면으로 상승해야 되는데, 이러한 과정에서 탈묵 효율을 향상시키기 위해서는 그 표면 특성에 의해 지배되는 입자와 기포간의 계면화학적인 측면의 조건 선정이 중요함을 알 수 있다. 그러나, 잉크입자가 기포에 부착하기 위해서는 먼저 양자간의 충돌이 일어나야 하는데, 이 단계는 주로 입자와 기포와의 접근빈도를 고려하는 유체역학적 이론과 관련되므로 이러한 관점에서 고찰이 또한 중요하다.

참고문헌

1. 최승만 . "Measures to increase the recovery rates of the waste paper", Journal of Korean Tappi, 26(1), 62-69(1994)
2. Douglas R.Crow and Ronald F.Secor : "The ten steps of deinking", Tappi J., 70(7), 101-106(1987).
3. Andy Harrison : "Flotation deinking is critical in unit process method of deinking", Pulp & Paper, March, 60-65(1989)
4. 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).
5. Larsson A., Stenius P., and Odberg L. : "Surface chemistry in flotation deinking-part 2", Svensk Papperstidning, 87(18), R165-R169(1984)
6. Loreen D. Ferguson : "Deinking chemistry-part 2", Tappi J., 75(8), 49-58(1992).
7. Klaus Hornfeck : "Chemicals and their mode of action in the flotation deinking process". Conservation & Recycling, 10(2/3), 125-132(1987).
8. R.W. Turvey : "Chemical use in recycling". Technology of paper recycling, 1st Edn., ed. R.W.J.McKinney, 138-141, Blackie Academic and Professional, London(1995).
9. Larsson A., Stenius P., and Odberg L. : "Surface chemistry in flotation deinking-part 1". Svensk Papperstidning, 87(18), R158-R164(1984).
10. D.J. Shaw : Introduction to colloid and surface chemistry,

Butterworth, London(1966).

11. T. Lindstrom : Some fundamental chemical aspects on paper forming, Vol.1, ed. C.F.Baker, 309-412, Research Symposium. Cambridge(1989).
12. Jacob N. Israelachvili and Patricia M. McGuggan : "Forces between surfaces in liquids", Science, Vol. 241, 795-799(1988).
13. Michael J. Jaycock and Dr Darren K. Swales : "The theory of retention", Paper Technology, October, 26-33(1994)
14. 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3分冊, 125-152(1992).
15. Zhenghe Xu and Roe-Hoan Yoon : "The role of hydrophobic interactions in coagulation", Journal of Colloid and Interface Science, 132(2), 532-541(1989).
16. Derjaguin B.V., Dukhin 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).
17. R.W.J. McKinney : "Wastepaper preparation and contamination removal", Technology of paper recycling, 1st Edn., 56-58, Blackie Academic and Professional, London (1995).
18. W Adamson : "The Solid/Liquid Interface-Contact Angle", Physical Chemistry of Surfaces. 5th Edn., 385-389, Wiley-Interscience, New York(1990).
- 19 T.H Quick and K.T. Hodgson : "Xerography deinking -a fundamental approach", Tappi J., 69(3), 102-106(1986).

學會誌 投稿 案内

種 類	内 容
論 說	提案, 意見, 批判, 時評
展望, 解説	現況과 將來의 견해, 研究 技術의 綜合解説, Review
技術報告	實際的인 試驗, 調査의 報告
技術, 行政情報	價値있는 技術, 行政情報를 간결히 解説하고, comment를 붙인다.
見 聞 記	國際會議의 報告, 國內外의 研究 機關의 見學記 등
書 評	
談 話 室	會員相互의 情報交換, 會員 自由스러운 말, 隨霜等
Group 紹介	企業, 研究機關, 大學 등의 紹介
研究論文	Original 研究論文으로 本 學會의 會誌에 掲載하는 것이 適當하다고 보여지는 것

수시로 원고를 접수하오니 많은 투고를 바랍니다.