

부유부상 공정에 있어서 표면 에너지의 역할

- 부유부상 효율에 있어 고형 입자의 표면 에너지 및 극성성분의 중요성 -

이학래[†] · 박 일 · 이용민 · 이진희 · 조중연^{*1} · 한신호^{*2}

(2002년 6월 10일 접수; 2002년 8월 5일 채택)

Influence of the Surface Energetics on Flotation Process

-Importance of the Surface Energy and Polarity of Solid Particles

in Flotation Efficiency-

Hak Lae Lee[†], Il Park, Yong Min Lee, Jin Hee Lee, Jung Yeon Jo^{*1}, and Sien Ho Han^{*2}

(Received on June 10, 2002; Accepted on August 5, 2002)

ABSTRACT

The object of this study was to determine the surface energy of hydrophobically modified microcrystalline cellulose (MCC) with AKD and evaluate the effect of surface energy of the solid particles dispersed in aqueous medium on flotation efficiency. Especially to eliminate the complication derives from the diverse parameters of solid particles including particle size, type, etc. MCC's modified with AKD have been used. The surface energy parameters were calculated from advancing contact angles of apolar and polar liquids on MCC pellets using the Lifshitz-van der Waals acid-base (LW:AB) approach.

Total surface energy of hydrophobic MCC ranged from 46.19 mN/m to 48.60 mN/m. The contribution of the acid-base components to the total surface energy ranged from 13% to 17% for hydrophobic MCC's. The effect of surface characteristics on the flotation efficiency was evaluated. It was shown that there exist critical values of surface energies to increase flotation efficiency. Total surface energy and polar component of solid particles should be lower than 47 mN/m and 7 mN/m, respectively, for effective removal in the flotation process.

Keyword: Microcrystalline cellulose, Flotation, Contact angle, surface energy, Lifshitz-van der Waals acid-base (LW:AB)

· 본 논문은 한국과학재단 특정기초연구과제 지원(과제번호: 1999-2-317-001-3)에 의해 수행되었음.

· 서울대학교 농업생명과학대학 임산공학과(Department of Forest Products, College of Agricultural and Life Sciences, Seoul National University, Suwon 441-744, Korea).

*1 용인송담대학 제지·패키징시스템과(Department of Paper Technology, Yong-In Songdam College).

*2 한국산업기술대학 화학공학과(Dept. Chemical Engineering, Korea Polytechnic University, Shihung 429-793, Korea).

† 주저자(Corresponding author): e-mail: lhakl@plaza.snu.ac.kr

1. 서론

우리 나라 제지산업은 인쇄 및 필기용지에 소요되는 대부분이 펄프 원료를 수입에 의존하고 있으나 산업용지와 신문용지 등은 대부분 재활용 섬유자원을 사용하여 제조하고 있어 대표적인 환경친화적 산업이라 할 수 있다. 재활용 섬유자원을 신문용지나 백판지의 이면층 등의 원료로 사용하기 위해서는 탈묵을 통하여 원료에 함유된 잉크를 제거하는 과정이 필요하다. 따라서 탈묵이란 재활용 섬유자원의 품질을 향상시키기 위한 가장 핵심적인 단위공정이라고 할 수 있으며, 국내에서는 이를 위해 부유부상 방식이 사용되고 있다.

부유부상 공정은 소수성을 띤 잉크입자를 기포에 부착시켜 기포와 함께 계 외로 배출하는 단위공정으로 고지의 사용량 증가와 인쇄방식의 다양화에 따라 부유부상 공정의 효율 증대가 고지 재활용의 고효율화를 위해 절실히 요구되고 있다. 부유부상 공정의 핵심적인 인자로는 부유부상을 통하여 제거되는 고형물질의 표면 특성, 특히 이 가운데에서도 소수화도가 중요하다는 것은 부분적으로 보고된 바 있으나 부유부상에 필요한 표면 특성이 부유부상 효율의 극대화와 어떤 상관성을 가지는지, 또 상관성을 가진다면 부유부상을 통하여 제거되는 고형물질의 표면 특성에는 어떤 입체치가 존재하는지에 대해서는 구체적인 연구가 부족한 실정이다. 이러한 배경에는 기존의 부유부상 공정에 영향을 미치는 인자의 역할을 구명하기 위해서 이들 인자를 독립적으로 분리하여 연구하기 보다는 일반 부유부상 실험을 통하여 얻어진 결과로부터 대체적인 경향을 설명하는데 만족하여 왔기 때문이라고 판단된다.

이에 본 연구에서는 부유부상 공정에 있어서 가장 중요한 인자의 하나로 인식되어 온 부유부상을 통하여 제거되는 고형 입자의 표면화학적 특성의 역할을 명확히 구명하기 위해서 마이크로 크리스탈린 셀룰로오스(microcrystalline cellulose: MCC)를 모델 물질로 사용하여 원료의 크기, 형상, 비중 등 원료의 다양한 특성을 단순화시키고, 단순히 이들의 표면 특성만을 AKD로 변화시킨 시료를 사용함으로써 고형 입자의 표면화학적 특성이 부유부상 공정에 미치는 영향을 독립적으로 평가하였다.

2. 표면 에너지 이론

2.1 접촉각을 이용한 표면 에너지 평가

주지하는 바와 같이 표면은 액체와 고체에서 관찰되며 표면에 위치한 분자는 내부의 분자와 다른 환경에 처해 있기 때문에 표면 장력 혹은 표면 에너지와 같은 표면 현상이 발생한다. 액체 내부에 존재하는 액체 분자의 경우에는 주위에 모두 액체 분자가 존재하기 때문에 분자 사이에 작용하는 인력이 어느 쪽으로도 치우치지 않은 상태로 존재하지만 액체 표면에 존재하는 액체 분자는 상부에 인접한 공기 분자에 의한 인력이 하부에 위치한 액체 분자에 의한 인력보다 월등히 작기 때문에 분자간 인력의 불균형이 발생하고 결과적으로 하부에 위치한 조밀한 액체 분자에 의해 액체 내부로 이끌리는 현상이 발생한다. 이와 같은 불균일한 인력 분포로 인하여 표면에 존재하는 액체 분자는 액체 내부로 이끌리고 있으며 따라서 표면의 액체 분자수는 줄어드는 경향을 보이게 된다. 반대로 말하면 액체 내부로부터 분자를 표면으로 이동시키는 데는 일이 필요하게 된다. 즉 액체의 표면을 증가시키기 위해서는 에너지가 필요하게 된다. 단위면적의 액체 표면적을 증가시키는데 소요되는 일을 표면 장력(surface tension) 또는 표면 에너지(surface energy)라고 부른다. 이와 같은 표면 에너지의 개념은 고체 표면에도 똑같이 적용될 수 있으며 이는 접촉각 측정이나 인버스 가스 크로마토그래피(inverse gas chromatography) 등의 방법으로 평가될 수 있다.

접촉각 측정에 의한 물질의 표면 에너지 분석 방법 가운데 van Oss에 의한 Lifshitz-van der Waals/acid-base (LW/AB) 산출 방법이 많이 사용되고 있다.¹⁾ 본 연구에서도 이 방법을 표면 에너지 분석에 사용하였다. 이 방법은 아래와 같이 요약 할 수 있다.

액체에 의한 고체의 젖음과 접촉각의 관계는 Young에 의해 Eq. [1]과 같이 나타낼 수 있다.²⁾

$$\gamma_s - \gamma_{sl} = \gamma_L \cos\theta \quad [1]$$

여기에서 γ_s 는 고체의 표면 에너지, γ_{sl} 는 고체와 액체의 계면 에너지, γ_L 은 액체의 표면 장력, θ 는 접촉각이다.

물질의 전체 표면 에너지(γ^{TOT})는 Eq. [2]와 같이 비극성 성분(γ^{LW})과 극성 성분(γ^{AB})으로 나눌 수 있다.³⁾

$$\gamma^{TOT} = \gamma^{LW} + \gamma^{AB} \quad [2]$$

이 가운데 γ^{AB} 는 Lewis acid-base에 의해 나타나는 표면 에너지를 의미하며, 이는 다시 electro-donor인 γ^- 와 electro-acceptor인 γ^+ 의 상호작용으로 나타낼 수 있고, 다음 Eq. [3]과 같이 표현할 수 있다.

$$\gamma^{AB} = 2(\sqrt{\gamma^+ \gamma^-}) \quad [3]$$

또 고체(S)와 액체(L)사이의 계면에너지 γ_{SL} 은 Eq. [4]와 같이 나타낼 수 있다.⁴⁾

$$\gamma_{SL} = (\sqrt{\gamma_s^{LW}} - \sqrt{\gamma_L^{LW}})^2 + 2(\sqrt{\gamma_s^+ \gamma_s^-} + \sqrt{\gamma_L^+ \gamma_L^-} - \sqrt{\gamma_s^+ \gamma_L^-} - \sqrt{\gamma_s^- \gamma_L^+}) \quad [4]$$

Young과 Dupre의 공식을 조합하면 Eq. [5]를 얻을 수 있으며, 여기에 Eq. [4]를 대입하여 정리하면 아래의 Eq. [6]를 유도할 수 있다.

$$\gamma_{SL}(1 + \cos\theta) = \gamma_s + \gamma_L - \gamma_{LS} \quad [5]$$

$$\gamma_{SL}(1 + \cos\theta) = 2(\sqrt{\gamma_s^{LW} \gamma_L^{LW}} + \sqrt{\gamma_s^+ \gamma_L^-} + \sqrt{\gamma_s^- \gamma_L^+}) \quad [6]$$

따라서 임의의 물질의 표면 에너지를 구성하는 세 가지 성분은, 액체 가운데 비극성 성분(γ_L^{LW}), 극성 성분(γ_L^{AB}), 산 혹은 염기 성분(γ_L^-, γ_L^+)을 알고 있는 두 종류의 극성 액체와 한 종류의 비극성 액체를 이용하여 이들의 접촉각을 측정하고, 이로부터 얻어지는 세 연결 방정식의 해를 구함으로써 산출할 수 있다. 이 때 사용되는 액체의 표면 장력(표면 에너지)과 이들의 비극성, 극성, 산 및 염기 성분은 문헌에 나타나 있다.²⁾



Fig. 1. SEM of MCC powder.

3. 재료 및 방법

3.1 공시재료

본 실험에 사용된 MCC(microcrystalline cellulose)로는 Fig. 1에서 보는 바와 같은 평균 입도 60 μ m의 MCC를 사용하였다. MCC는 강한 세척 견뢰도를 지닌 흑색 염료(diresul black RP liquid)를 사용하여 검은색으로 염색하였다. 염색 처리에 의해 MCC의 친수성은 변화되지 않았다. 본질적으로 친수성을 띠는 MCC에 다양한 소수화 수준을 부여하기 위해 왁스 형태의 AKD(alkylketene dimer)와 에테르를 이용한 용매 사이징 방법을 활용하였다. 사이징 처리된 MCC의 표면 특성을 평가하기 위한 접촉각 측정에는 증류수와 순도 99.9%의 ethylene glycol, formamide 그리고 diiodomethane을 사용하였다.(Table 1) 제조된 친수성 MCC와 소수성 MCC의 혼합비에 따라 부유부상 시 제거 효율을 평가하기 위해 부유부상 실험을 실시하였다. 부유부상 실험에는 계면활성제로 EO:PO 몰비가 18:11인 stearyl alcohol(1-octadecanol)계통

Table 1. Properties of liquids used for measuring the advancing contact angle

mN/m	Diiodomethane (CH ₂ I ₂)	Formamide (HCONH ₂)	Distilled water (H ₂ O)	Ethylene glycol (OHCH ₂) ₂
Surface energy (γ)	50.80	58.00	72.80	48.00
Dispersive component (γ^{LW})	50.80	39.00	21.80	29.00
Polar component (γ^{AB})	0	19.00	51.00	19.00
Acid component (γ^+)	0	2.28	25.50	1.92
Base component (γ^-)	0	39.60	25.50	47.00

의 비이온성 계면 활성제를 사용하였으며, 기타 가성 소다와 알룸(alum) 및 diethyl ether을 사용하였다.

3.2 실험 방법

3.2.1 MCC 염색 및 소수성의 MCC의 제조

농도 23%인 MCC 슬러리를 비이커에 넣고 교반하면서 흑색 염료를 MCC 전건무게 대비 10% 투입한 다음 pH가 6.5가 되도록 알룸을 첨가하여 염료가 MCC에 정착되도록 한 후 세척하여 친수성을 유지하지만 흑색을 띠는 MCC를 제조하였다. MCC를 소수화하기 위해서 무처리 MCC 300g을 1000mL의 diethyl ether에 넣고 충분히 교반한 뒤 여기에 MCC 전건무게에 대해서 0.05, 0.10, 0.15, 0.20%의 AKD(alkyl ketene dimer)를 30mL의 diethyl ether에 용해시켜 투입하고 10분간 더 교반하였다. 이를 증발기로 옮기고 약 30분간 diethyl ether를 증발시켰다. 이 때 증발기의 항온수조 온도를 40℃로 유지하였으며 MCC 슬러리는 잘 교반되도록 증발기 플라스크의 회전수를 조정하였다. 30분간에 걸쳐 diethyl ether를 증발시키고 난후 항온수조의 온도를 90℃로 높여 30분간 더 가열하였다. 이러한 과정을 통하여 diethyl ether에 용해되어 있던 AKD 분자는 MCC 표면에 균일하게 도피되고 가열 건조 과정을 통하여 셀룰로오스의 수산기와 반응토록 유도하였다. 건조된 MCC는 다시 4L의 diethyl ether를 이용하여 세척함으로써 미반응 AKD를 용출시킨 다음 다시 위와 동일한 조건으로 증발 건조를 실시하여 백색 분말상의 AKD로 사이징 처리된 MCC를 제조하였다.

3.2.2 접촉각 측정을 위한 MCC 원판 제조

AKD에 의해 소수화된 분말 상의 MCC의 표면 특성을 평가하기 위하여 일차적으로 분말상의 MCC 0.3g을 IR 펄릿 제조용 프레스 셀에 넣은 다음 60초 동안 압력을 가하여 직경 13mm 및 두께 1.56~1.66mm의 MCC 원판을 제조하였다. 원판 제조 시 3.76kN/cm²와 7.53kN/cm²의 두 가지 압력을 적용하고 그 표면을 전자현미경 사진으로 분석한 결과 3.76kN/cm²을 사용한 MCC 원판의 MCC 입자가 과도한 변형이 발생하지 않은 것으로 판단되었다.(Figs. 2-3)



Fig. 2. SEM of the pellet surface pressed under the pressure of 3.76 kN/cm².

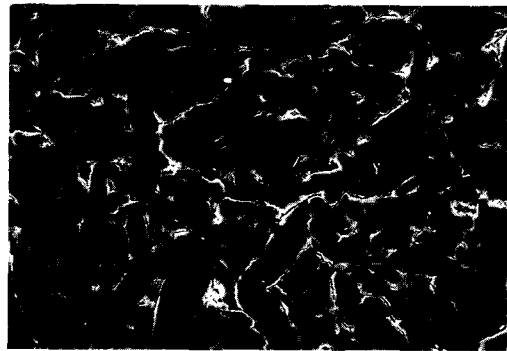


Fig. 3. SEM of the pellet surface pressed under the pressure of 7.53 kN/cm².

3.2.3 접촉각 측정

제조된 MCC 원판을 Kruss사의 tensiometer K12/K14을 이용하여 Table 1에 나타난 액체의 접촉각을 측정하였다. Fig. 4는 증류수를 이용한 소수화 정도가 다른 원판의 접촉각 측정 그래프를 나타낸 것으로 원판의 함침 위치에 따른 측정값을 보여주고 있다. Tensiometer에 의해 접촉각은 자동적으로 계산되어진다.

3.2.4 부유부상 실험

친수성 흑색 MCC와 소수성 백색 MCC를 비이커에 일정 비율이 되도록 첨가한 후 40℃의 증류수를 이용하여 농도 1%가 되도록 조절하였다. 이를 지름 8cm.

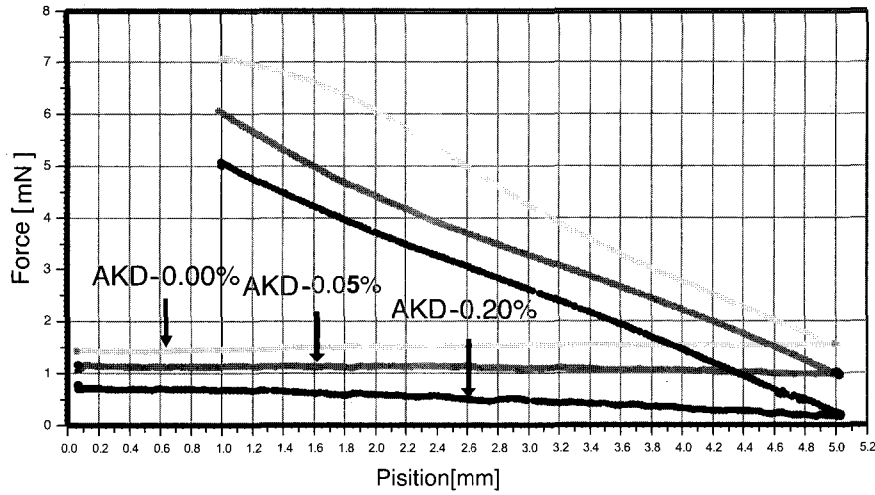


Fig. 4. Relationship between force and position for MCC pellets immersed to and retrieved from distilled water.

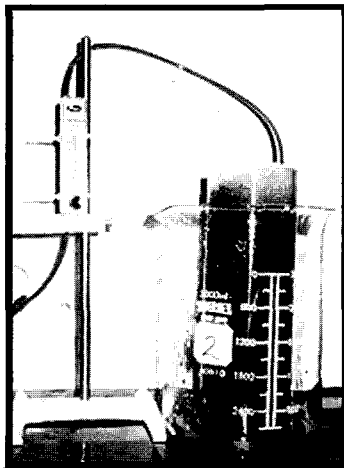


Fig. 5. Experimental cylinder flotation cell.

높이 23.8cm 전체 부피 1000mL인 실린더로 옮기고 MCC 전건무게 대비 0.5%의 계면 활성제 첨가하고 가성소다를 이용하여 pH를 10.5로 조절한 다음, 2분간 예비 교반 후 공기의 유량 5L/min이 되도록 부유부상을 실시하였다. 본 실험에 사용된 부유부상기는 Fig. 5와 같다. 부유부상 실험을 통하여 리젝트로 모아진 MCC와 잔류한 MCC의 양을 측정하였다.

3.2.5 백색도 측정 및 검량선 작성

지름 55mm의 No. 2 Whatman 여과지를 유리 필터 위에 놓고 전건무게 0.16g의 시료를 여과시켜 패드

를 형성한 후 3.5bar의 압력으로 2분간 압착하였다. 이를 상온에서 건조시켜 백색도 측정용 패드를 완성하였다. 준비된 패드는 Technidyne사의 백색도 측정기를 이용하여 백색도를 측정하였다. 염색된 흑색 MCC와 소수성의 백색 MCC를 여러 비율로 혼합하여 패드를 제조하여 백색도를 측정하고 이를 바탕으로 검량선을 작성하였다. 부유부상을 통하여 얻어진 리젝트의 백색도를 측정하고 검량선으로부터 흑색과 백색 MCC의 혼합비율을 산출하였다.⁸⁾

4. 결과 및 고찰

4.1 소수화 정도가 다른 MCC의 표면 특성 평가

4.1.1 소수화된 MCC의 접촉각

친수성 MCC와 소수화된 MCC 원판에 대한 액체의 접촉각을 Wilhelmy plate 방법으로 측정하였고 그 결과를 Fig. 6에 도시하였다. AKD는 MCC 표면에 존재하는 수산기와 반응하여 β -keto ester를 형성하여 MCC에 소수성을 부여하므로 AKD의 첨가 정도에 따라 MCC의 소수화 정도가 달라진다. 증류수의 advancing 접촉각 측정 결과 Fig. 6에서 보는 바와 같이 소수화 되지 않은 MCC는 47.57°였으며 AKD 0.05%, 0.10%, 0.15%, 0.20%로 소수화 시킨 MCC의 경우에는 56.47°, 62.10°, 66.80°, 67.07°로 계속 증가

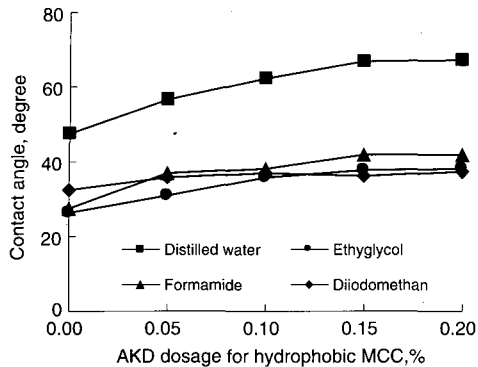


Fig. 6. Advancing contact angle of four liquids on AKD sized MCC pellets.

하였다. 또 MCC의 소수화가 증가할수록 advancing 접촉각이 ethylene glycol은 26.30°에서 38.17°로, formamide는 27.37°에서 41.77°로, diiodomethane은 32.53°에서 37.33°으로 증가하였다.

AKD로 사이징되지 않은 친수성 MCC의 접촉각 측정 결과 distilled water(45.75°) > diiodomethane (32.53°) > formamide(27.37°) > ethylene glycol (26.30°) 순으로 측정되었다. 그러나 AKD 0.10%로 소수화된 MCC의 경우 접촉각은 distilled water (62.10°) > formamide(38.28°) > diiodomethane (36.97°) > ethylene glycol(35.90°) 순으로 나타났다. 즉 소수화가 진행됨에 따라 극성 성분을 지니지 않는 diiodomethane의 접촉각 변화가 가장 작게 나타난 반면 극성 성분이 큰 증류수의 접촉각 변화가 가장 크게 나타났다.

4.1.2 소수화된 MCC의 표면 에너지

소수화된 정도가 다른 분말상 MCC를 원판으로 제조하여 접촉각을 측정한 다음 측정된 접촉각을 Eq. [6]에 대입하여 Table 2에서 보는 바와 같은 소수화 정도가 다른 MCC의 전체 표면 에너지와 그 구성 요소인

비극성 성분, 극성 성분, 그리고 산-염기 성분을 산출하였다. 본래 친수성 MCC의 경우 표면 에너지는 52.63 mN/m로 이 가운데 비극성 성분 41.77mN/m, 극성 성분 10.86mN/m를 나타내고 있었으나 소수화가 진행된 MCC의 경우 표면 에너지가 48.60mN/m에서부터 46.19mN/m까지 서서히 감소하였다. 이는 비극성 성분이 아닌 극성 성분의 변화에 의해 발생된 것으로 나타났다.(Table 2)⁶⁾ 이에 따라 친수성 MCC의 경우 전체 표면 에너지의 79.3%를 점유하던 비극성 성분의 비율이 소수성 MCC의 경우에는 전체 표면 에너지의 86.4%까지 증가하였다. 따라서 MCC의 표면 에너지는 비극성 성분에 의해 주로 결정된다고 할 수 있으나 소수화 처리에 의한 액체의 접촉각 변화는 주로 극성 성분의 변화에 의해 나타나고 있음을 알 수 있다. 즉 MCC의 소수화 처리가 진행되더라도 비극성 성분은 산-염기 성분으로 구성된 극성 성분에 비해 큰 변화를 나타내지 않는 경향이 매우 크다고 할 수 있다.⁶⁾

또 Table 2에서 보는 바와 같이 MCC를 소량의 AKD로 소수화시킬 경우, 즉 소수화 초기에 극성 성분의 값이 더욱 크게 감소하였으며, 이는 주로 염기성 성분의 변화에 의해 발생하였다. 반면에 산성 성분의 변화는 불규칙한 경향을 나타내었다. 이러한 경향은 IGC를 이용한 연구에서도 밝혀진 바 있다.⁹⁾

염기성 성분의 변화가 소수화된 MCC에서 크게 나타나고 있는 이유는 MCC 표면의 수산기 함량이 AKD에 의한 소수화에 따라 감소되기 때문이다.⁷⁾ 또한 소수성 MCC의 경우에는 염기성 성분의 비율이 산성 성분에 비해 큰 것은 친수성 MCC 표면의 수산기와 AKD가 결합하여 수산기의 산성 성분이 감소되기 때문이다.

4.2 검량선 작성 및 부유부상

4.2.1 검량선 작성

흑색의 친수성 MCC와 백색의 소수성 MCC를 여러

Table 2. Surface energy parameters of MCC

AKD (%)	Total surface energy (mN/m)	Dispersive component (mN/m)	Polar component	Acid component	Base component
0.00	52.63	41.77 (79.3)	10.86 (20.7)	1.17	25.09
0.05	48.60	40.28 (82.9)	8.32 (17.1)	0.91	19.05
0.10	47.74	39.77 (83.3)	7.97 (16.7)	1.18	13.41
0.15	46.49	40.18 (86.4)	6.31 (13.6)	0.97	10.25
0.20	46.19	39.63 (85.8)	6.56 (14.2)	1.08	9.94

Table 3. Effect of the ratio of hydrophilic black MCC to hydrophobic white MCC and AKD on the reject ratio after flotation

Black/White	AKD 0.00%	AKD-0.05%	AKD-0.10%	AKD-0.15%
0/100	1.61%	7.25%	18.46%	68.70%
20/80	0.66%	5.62%	17.72%	38.08%
50/50	0.17%	1.39%	7.52%	23.71%

Table 4. Composition of hydrophobic and hydrophilic MCC in flotation reject

	AKD-0.05%	AKD-0.10%	AKD-0.15%
Hydrophobic MCC	84.80%	96.40%	98.45%
Hydrophilic MCC	15.20%	3.60%	1.55%

비율로 혼합하여 백색도 측정용 패드를 제조하여 백색도를 측정하고 이를 기초로 한 검량선을 작성하였다. 이 검량선을 활용하면 흑색과 백색 MCC가 입자의 비율로 혼합된 시료 패드의 백색도를 측정하면 흑색과 백색 MCC의 혼합비율을 구할 수 있다.⁸⁾

친수성 흑색 MCC와 MCC 전건무게에 대하여 AKD를 0.05%, 0.10%, 0.15%, 0.20% 첨가하여 소수화시킨 백색의 소수성 MCC를 0/100, 20/80, 50/50 비율로 혼합하여 부유부상기에서 처리한 결과 리젝트의 발생량은 Table 3과 4에서와 같이 소수성 MCC의 양이 증가할수록 또 MCC의 소수화 정도가 높아질수록 크게 증가하였다. 부유부상에 의하여 리젝트된 혼합 MCC의 백색도를 측정하고 작성된 검량선을 이용하여 흑색과 백색 MCC의 비율로 평가한 결과는 Table 4에 나타내었다.

Table 4에서 보는 것과 같이 MCC 전건 무게의 0.05%에 해당하는 AKD를 이용하여 소수화시킨 MCC의 경우 리젝트에 함유된 소수화된 MCC가 84.8%였다. 그러나 MCC의 소수화에 사용된 AKD 함량이 0.10%와 0.15%로 증가한 경우 리젝트 내의 소수화된 MCC 함량은 95% 이상으로 높아졌다. 이는 소수화된 MCC가 부유부상공정에서 선택적으로 제거된다는 것을 극명하게 보여줄 뿐 아니라 부유부상 시 소수성 MCC가 기포에 선택적으로 포집되며 포집될 확률은 소수화 정도가 강할수록 높다는 것을 보여주고 있다.

4.3 MCC의 표면 특성에 따른 부유부상 효율

부유부상공정에서 기포에 대한 MCC 입자의 흡착 특성이 입자의 표면 에너지와 연관성을 가지고 있다는

것은 부유부상 공정에서의 리젝트 비율이 소수화도가 증가할수록 커진다는 사실을 통하여 실증되었다. 하지만 부유부상공정에서의 리젝트 비율은 표면 에너지와 어떤 정량적 관계를 갖는지는 아직 밝혀지지 않았다. 이에 대한 해답을 찾기 위해서 Figs. 7-8에는 흑색의 친수성 MCC와 백색의 소수성 MCC를 0/100, 20/80, 50/50으로 혼합한 MCC 혼합물을 부유부상 공정으로 처리하였을 때 얻어지는 리젝트 비율을 총 표면 에너지와 표면 에너지 극성 성분의 함수로 도시하였다. 여기에서 보는 것과 같이 MCC 입자의 총 표면 에너지가 47 mN/m 이상의 경우에는 리젝트율이 낮게 나타났으며, 그 이하의 경우에는 급속히 증가하였다. 따라서 부유부상 공정에 투입되는 고히 입자의 표면에너지가 47 mN/m 이상의 경우에는 부유부상 효과가 크게 저하된다고 말할 수 있다. 또 리젝트율을 극성 성분의 함수로 도시한 Fig. 8을 보면 표면 에너지의 극성 성분이 7 mN/m 이하에서 리젝트율이 급속히 증가하는 것을 알 수 있다. 즉 MCC 입자의 극성

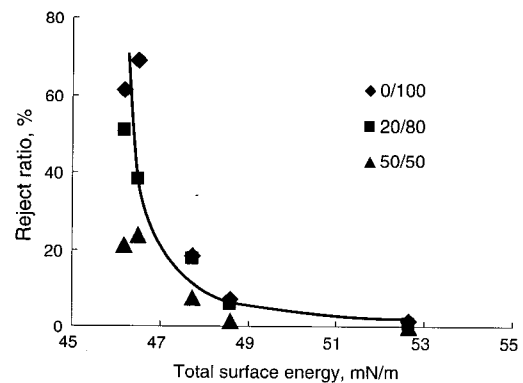


Fig. 7. Reject ratio relation of total surface energy.

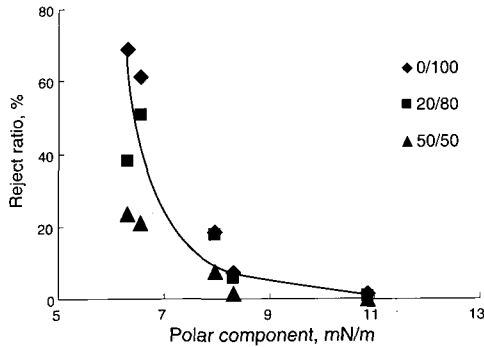


Fig. 8. Reject ratio relation of polar component

표면 에너지가 7 mN/m 이하로 저하되어야만 부유부상 공정에서 효과적인 제거가 가능하다.

5. 결론

본 연구에서는 부유부상 공정에서 분리 효율과 입자의 표면 에너지의 관계를 구명하기 위해서 AKD로 소수화도를 달리한 소수성의 백색 MCC 입자와 흑색 염료로 염색한 친수성의 흑색 MCC 입자 혼합물을 이용하여 부유부상 실험을 실시하였으며, 리젝트로 제거된 MCC의 구성을 백색도 측정을 통하여 평가하였다. 또 친수성 및 소수성 MCC의 표면 에너지를 접촉각 측정을 통하여 평가함으로써 MCC 입자의 표면 에너지와 부유부상 공정에서의 리젝트율과의 관계를 구명하였다.

그 결과 친수성 MCC는 52.63mN/m의 표면 에너지를 나타내었고, 소수화가 진행됨에 따라 전체 표면 에너지가 점차 저하되어 46.19 mN/m까지 낮아졌다. 이러한 표면 에너지의 저하는 표면 에너지의 극성 성분, 특히 염기성 성분의 감소에 의해 발생하는 것으로 나타났다. 또 부유부상 처리 시 소수성 MCC의 비율이 증가할수록 기포에의 포집 확률이 증가되어 리젝트 비율이 증가되었다. 정량적으로는 소수화 MCC의 표면 에너지가 47 mN/m, 표면 에너지의 극성 성분이 7 mN/m 이하인 경우 소수화된 MCC의 제거 비율이 급속히 상승하였다.

인용문헌

- Gardner, D., J., Application of the Lifshitz-van der waals acid-base approach to determine wood surface tension components, *Wood Fiber Sci. J.*, 28, 422-428 (1996).
- Gindl, M., Sinn, G., Gindl, W., Reiterer, A. and Tschegg, S., A comparison of methods to calculate the surface free energy of wood using contact angle measurements, *Colloid Interf. Sci. J.*, 181, 279 (2001).
- Janczuk, B., Bialopiotrowicz, T. and Zdziennicka, A., Some remarks on the components of the liquid surface free energy, *Colloid Interf. Sci. J.* 211, 96 (1999).
- Van Oss, C. J., M.K. Chaudhury, R.J and Good, Monopolar surfaces, *Chem. Rev.* 88, 927 (1988).
- Van Oss, C.J., Giese, R. F. and Wu, W., Change in surface properties of solids caused by grinding, *Adhesion J.* 63, 71 (1997).
- Luner, P., Contact Angle, Wettability and Adhesion, Ed., Mittal, K. L., Vol 3, 4, 383-396, VSP Press, Netherlands (1993).
- Luner, P., Oh, E., Characterization of the surface free energy of cellulose ether films, *Colloid Interf. Sci. J.*, 181, 31 (2001).
- 이학래, 이진희, 허용성, 조중연, 한신호, 부유부상 공정에 대한 표면화학적 연구-부유부상 효율과 고형 입자의 소수화도, *펄프종이기술 33(1):1* (2001).
- 이학래, 이용민, 이진희, 박일, 조중연, 한신호, 인버스 가스 크로마토그래피를 이용한 소수화된 MCC의 표면 특성 분석, *펄프종이기술 34(3):* (2002).