

부상부유 탈묵공정의 모델링 및 전산모사

조병욱, 류정용, 박대식, 신은주, 송봉근
한국화학연구원, 바이오정밀화학연구센터

1. 서 론

부상부유 탈묵공정은 소수성을 띤 잉크입자를 기포에 부착시켜 기포와 함께 계 외로 배출하는 단위공정이다. 부상부유 탈묵공정의 이상적 목표는 섬유 등 제지용 원료로 사용되는 성분은 지료 내에 최대한 남겨두고, 잉크나 스티키등의 이물질은 최대한 제거하는 것이다. 또한 부상부유 탈묵공정은 지료 내의 충전제나 미세분을 분급하기 위한 목적으로도 사용될 수 있다¹⁻³⁾.

잉크 및 기타 이물질의 제거 효율은 flotation cell의 종류와 사용하는 탈묵제의 종류와 사용량, 콜로이드 화학적 인자 등에 의해서 영향을 받는다. 필요한 flotation cell의 수 또는 cell에서의 체류시간, flotation cell의 배열을 몇 단으로 할지, 또한 각 flotation cell들의 배열을 어떻게 할지는 생산하고자 하는 지종 및 현장에서 요구되는 탈묵펄프의 특성, 전체 공정의 특성에 따라서 달라진다. 이러한 것을 현장에서 직접 실험을 통해서 결정하기는 힘들고, 전산모사 통해서 검증하는 것이 안전한 방법이다. Park은 Aspen Tech사의 Aspen plus와 Aspen water를 사용하여 여러 부상부유 시스템을 전산 모사하여 최적의 flotation cell 배열을 찾고자 하였다⁴⁾.

이 논문에서는 부상부유공정의 물질수지를 작성하여 모델링하고, 이 모델과 실험결과를 사용하여 spreadsheet 프로그램을 활용하여 Fig.1에 보이는 두 부상부유 탈묵공정을 전산 모사하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

OCC를 펄핑한 지료를 공시재료로 사용하였다. Voith사의 실험실용 부상부유기를 사용하여 45°C, 1%의 펄프농도에서 10분간 부상부유 처리하였다. 2분을 실제 부상부유 탈묵공정에서 한 cell에서의 체류시간으로 가정하고, 2분 동안 배출되는 foam reject를

모아서 샘플링하고 분석하였다. 또한 10분간 부상부유 처리한 accept 지료를 분석하였다. Reject와 accept내의 섬유, 충전제, ink, DCM(dichloromethane) 추출물을 정량하였다. 충전제 함량은 시료를 400°C에서 하루 동안 태워 회분율을 측정하여 결정하였고, ink 함량은 시료로 pad를 성형한 후 잔류잉크농도(ERIC)을 측정하여 결정하였다. DCM 추출물은 스티키 함량을 측정하기 위해서 행하였다. 섬유함량은 hyper washing을 행한 후, 무게를 측정하여 결정하였다. 섬유 미세분은 전체 고형분 무게에서 섬유, 충전제, 스티키, 잉크 무게를 뺀 값으로 정의하였다.

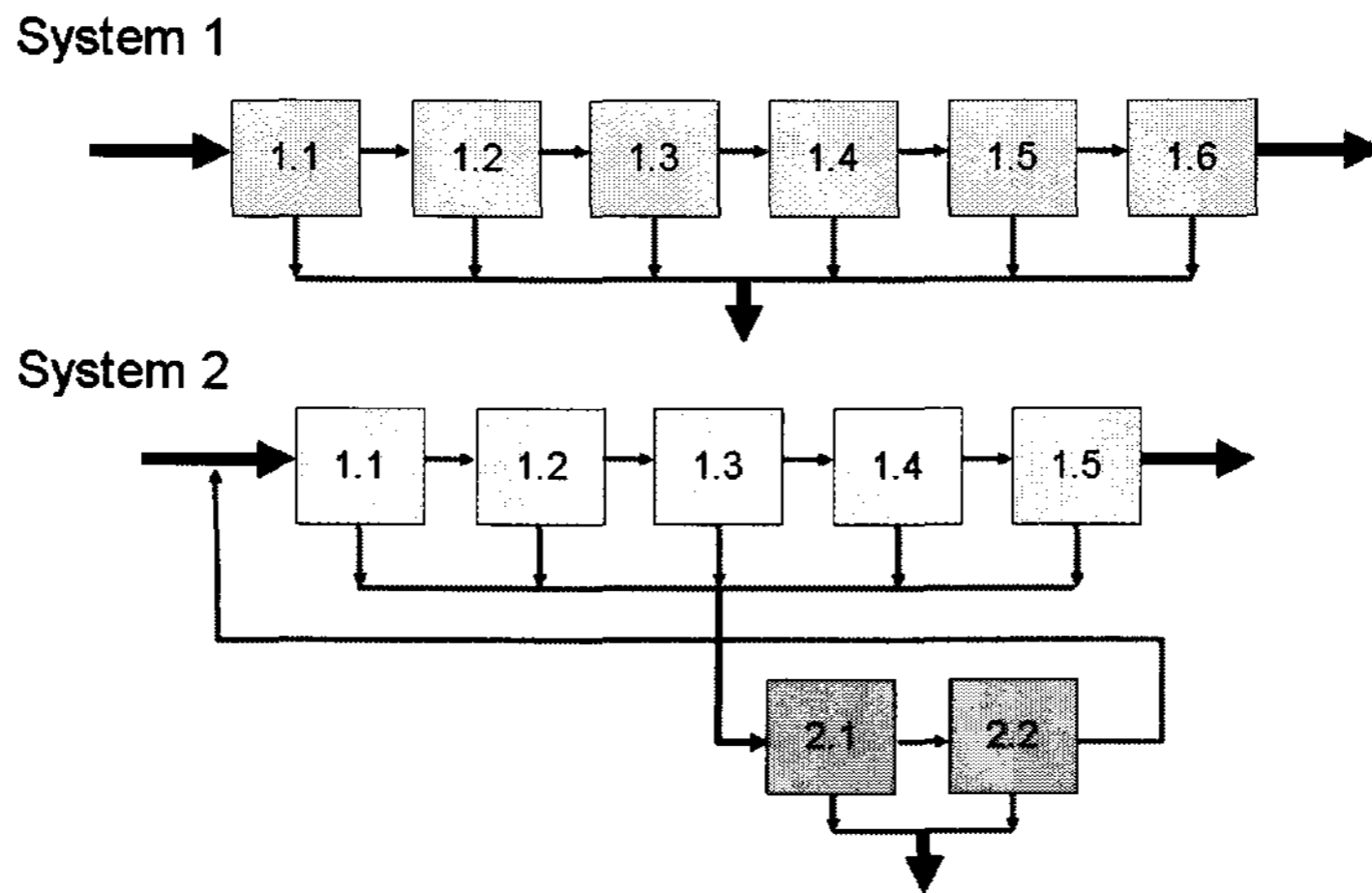


Fig. 1. Diagram of flotation deinking systems.

3. 모델링

섬유, 미세분, 충전제, 잉크, DCM 추출물의 다섯 가지 물질의 물질수지(mass balance)를 작성하고자 하였다. 부상부유 탈묵공정의 한 cell에서 다섯 물질들의 물질수지는 다음과 같다.

$$M_{F,j} = M_{A,j} + M_{R,j} \quad (j = \text{fiber, fines, filler, ink and DCM ext.}) \quad (1)$$

M = mass flow rate, F = feed flow, A = accept flow, R = reject flow를 나타낸다.

각 cell에 유입되는 물질의 양($M_{F,j}$)과 리젝트로 제거되는 물질의 양($M_{R,j}$)의 비

는 reject ratio(K_j)로 정의 된다.

$$K_j = \frac{M_{R,j}}{M_{F,j}} = \frac{M_{R,j}}{M_{A,j} + M_{R,j}} \quad (2)$$

여러 cell들이 배열해 있을 경우, feed flow 내 각 물질의 mass flow($M_{Fi,j}$, i =cell 번호)를 알고, 각 cell에서 제거되는 각 물질의 비, 즉 reject ratio ($K_{i,j}$, i = cell 번호)를 알면 i 번째 cell의 reject flow내 각 물질의 양($M_{Ri,j}$)을 다음으로부터 계산 할 수 있다.

$$M_{Ri,j} = K_{i,j} \cdot M_{Fi,j} = K_{i,j} \cdot M_{A(i-1),j} \quad (3)$$

그리고 i 번째 cell의 accept flow내 각 물질의 양($M_{Ai,j}$)은 다음 식에 의해 구할 수 있다.

$$M_{Ai,j} = M_{Fi,j} - M_{Ri,j} = M_{A(i-1),j} - M_{Ri,j} = (1 - K_{i,j}) \cdot M_{A(i-1),j} \quad (4)$$

각 cell마다 각기 다른 값의 reject ratio를 가진다고 가정하면, 전산모사를 하기 위해서는 각 cell의 조건을 그대로 재현하여 실험을 여러번 반복해야한다. 본 연구에서는 모든 cell에서 각 물질의 reject ratio는 같은 값을 가진다고 가정하였다. 즉, Fig. 1의 system 1의 경우를 예로 들면,

$$\hat{K}_j = K_{1.1,j} = K_{1.2,j} \cdots = K_{1.6,j} \quad (5)$$

\hat{K}_j 에서 hat(^) 표시는 K_j 의 값이 실제 값이 아니라 가정치 임을 의미한다. 또한 각 물질들은 reject ratio가 다른 하나 또는 여러 개의 구성성분으로 이루어져 있음을 가정하였다. 예를 들면, 섬유는 reject ratio가 다른 두 가지 종류의 섬유로 구성되어 있다. 즉, flotation cell에서 제거가 상대적으로 잘 되지 않는 fiber-1과 제거가 잘 되는 fiber-2로 구성되어 있다. 따라서 이 둘은 다른 reject ratio($\hat{K}_{j,k}$)를 가진다 (즉,

$\widehat{K}_{j, \text{fiber}-1}$ 과 $\widehat{K}_{j, \text{fiber}-2}$ 가 있고 $\widehat{K}_{j, \text{fiber}-1} < \widehat{K}_{j, \text{fiber}-2}$, $j = \text{fiber}$). Reject ratio가 $\widehat{K}_{j, \text{fiber}-1}$ 와 $\widehat{K}_{j, \text{fiber}-2}$ 인 섬유내 fraction을 각각 $\widehat{\Phi}_{j, \text{fiber}-1}$ 와 $\widehat{\Phi}_{j, \text{fiber}-2}$ 로 정의한다. 즉, $\widehat{\Phi}_{j, \text{fiber}-1} + \widehat{\Phi}_{j, \text{fiber}-2} = 1$.

첫번째 cell에 유입되는 섬유의 mass flow는 다음 식에 의해서 구할 수 있다.

$$\widehat{M}_{F1, \text{fiber}, \text{fiber}-1} = M_{F1, \text{fiber}} \cdot \widehat{\Phi}_{\text{fiber}, \text{fiber}-1} \quad (6)$$

$$\widehat{M}_{F1, \text{fiber}, \text{fiber}-2} = M_{F1, \text{fiber}} \cdot \widehat{\Phi}_{\text{fiber}, \text{fiber}-2} \quad (7)$$

일반화하면, 첫 번째 cell로 유입되는 물질의 mass flow($\widehat{M}_{F1, j, k}$, $j = \text{fiber, fines, filler, ink and DCM ext.}$)는 다음 식에 의해서 구할 수 있다.

$$\widehat{M}_{F1, j, k} = M_{F1, j} \cdot \widehat{\Phi}_{j, k} \quad (8)$$

각 물질의 feed flow내의 mass flow($M_{F1, j}$)는 실험에 의해서 구할 수 있다. 각 cell에서 다음 cell로 옮겨가는 즉 accept flow내의 각 물질의 mass flow는 다음에 의해서 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \widehat{M}_{A1, j, k} &= \widehat{M}_{F1, j, k} \cdot (1 - \widehat{K}_{j, k}) \\ \widehat{M}_{A2, j, k} &= \widehat{M}_{A1, j, k} \cdot (1 - \widehat{K}_{j, k}) \\ &\vdots \\ \widehat{M}_{Ai, j, k} &= \widehat{M}_{A(i-1), j, k} \cdot (1 - \widehat{K}_{j, k}) \\ &\vdots \\ \widehat{M}_{An, j, k} &= \widehat{M}_{A(n-1), j, k} \cdot (1 - \widehat{K}_{j, k}) \end{aligned} \quad (9)$$

i = cell의 번호, n = cell의 개수를 나타낸다.

마찬가지로 각 cell의 reject flow내의 각 성분은 다음 식으로부터 계산할 수 있다.

$$\widehat{M}_{R1,j,k} = \widehat{M}_{F1,j,k} \cdot \widehat{K}_{j,k} \quad (10)$$

$$\widehat{M}_{R2,j,k} = \widehat{M}_{A1,j,k} \cdot \widehat{K}_{j,k}$$

⋮

$$\widehat{M}_{Ri,j,k} = \widehat{M}_{A(i-1),j,k} \cdot \widehat{K}_{j,k}$$

⋮

$$\widehat{M}_{Rn,j,k} = \widehat{M}_{A(n-1),j,k} \cdot \widehat{K}_{j,k}$$

각 cell에서 배출되는 reject flow내 각 물질의 mass flow($\widehat{M}_{Ri,j}$)는 각 물질을 구성하는 각기 다른 reject ratio를 가지는 구성성분들의 합과 같다. 예를 들면

$$\widehat{M}_{Ri, fiber} = \widehat{M}_{Ri, fiber, fiber-1} + \widehat{M}_{Ri, fiber, fiber-2} \quad (11)$$

일반화하면,

$$\widehat{M}_{Ri,j} = \sum_{k=1}^m \widehat{M}_{Ri,j,k}$$

(12)

각 물질별로 다른 reject ratio를 가지는 구성성분의 비(즉, $\widehat{\Phi}_{j,k}$)와 reject ratio ($\widehat{K}_{j,k}$)의 값을 변화시키면서 각 cell에서 배출되는 reject flow내의 각 물질의 mass flow($\widehat{M}_{Ri,j}$)를 계산하고, 이 계산된 값($\widehat{M}_{Ri,j}$)이 실험한 값($M_{Ri,j}$)과 같으면 $\widehat{\Phi}_{j,k}$ 와 $\widehat{K}_{j,k}$ 의 값이 정확한 것으로 간주했다. 각 cell에서 계산값($\widehat{M}_{Ri,j}$)과 실험값($M_{Ri,j}$)의 차의 제곱을 계산하고, 각 cell들의 값을 전부 더한 값이 최소치가 되도록 하는 $\widehat{\Phi}_{j,k}$ 와 $\widehat{K}_{j,k}$ 값을 찾았다. 즉, 다음의 조건(Eq. 13)을 만족시키는 $\widehat{\Phi}_{j,k}$ 와 $\widehat{K}_{j,k}$ 값을 찾았다. 이것은 Excel의 Solver에 의해서 구해졌다.

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^n (M_{Ri,j} - \widehat{M}_{Ri,j})^2 \right\} \quad (13)$$

(i = cell number; j = fiber, fines, filler, ink and DCM ext.)

또한 각 물질이 몇 개의 구성성분으로 되어 있는지의 여부, 즉, $\hat{K}_{j,k}$ 에서 k 의 최
대치 (Eq. 12에서 m)는 여러 번의 시도에 의해서 Eq. (13)의 조건이 가장 최소치가 되
는 값으로 결정하였다.

$\hat{\phi}_{j,k}$ 와 $\hat{K}_{j,k}$ 의 값이 결정된 다음에, Eqs. (8), (9), (10)을 사용하여, 각 cell에서의
mass balance를 작성할 수 있다. Fig. 1의 system 2와 같이 circulation flow가 있는 경
우는 Excel의 [Tool\Option\Calculation]에서 Manual과 Iteration을 선택함으로써 계산
할 수 있다.

4. 결과 및 고찰

Table 1은 계산된 섬유, 미세분, 충전제, 잉크, DCM 추출물의 fraction과 reject ratio
를 보여준다. 잉크는 reject ratio가 0.24인 한 가지만 존재한다고 가정했을 때 계산값
($\hat{M}_{Ri, ink}$)과 실험값($M_{Ri, ink}$)의 차가 가장 적었고, 다른 네 가지 물질들은 두 가지
구성성분이 있다고 가정했을 때 계산값과 실험값의 차가 가장 적었다.

Table 1. Fractions and reject ratios of fiber, fines, filler, ink and DCM extractives.

Components		Fraction (%), $\hat{\phi}_{j,k}$	Reject ratio, $\hat{K}_{j,k}$
Fiber	Fiber-1	95	0.0001
	Fiber-2	5	0.0897
Fines	Fines-1	83	0.0572
	Fines-2	17	0.4263
Filler	Filler-1	83	0.2843
	Filler-2	17	0.0134
Ink	Ink-1	100	0.2414
DCM ext.	DCM-1	86	0.1514
	DCM-2	14	0.6852

Table 1에 보여주는 $\hat{\Phi}_{j,k}$ 와 $\hat{K}_{j,k}$ 값들을 사용하여 Fig. 1의 system 1을 Excel을 사용하여 전산 모사하였다. Figs. 2~5는 전산 모사 결과를 보여준다. Flotation cell의 수가 증가함에 따라 foam reject로 제거되는 물질의 양이 2.5%에서 8.8%로 증가하고 이에 따라서 수율도 97.6%에서 91.2%로 감소하였다(Fig. 2).

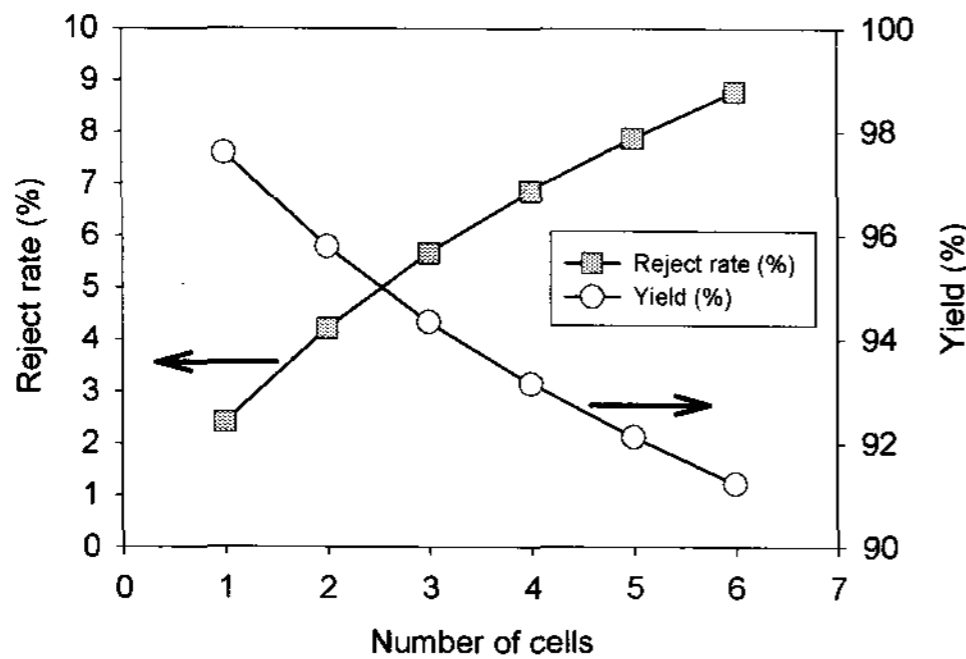


Fig. 2. Effect of number of cells on yield and reject rate.

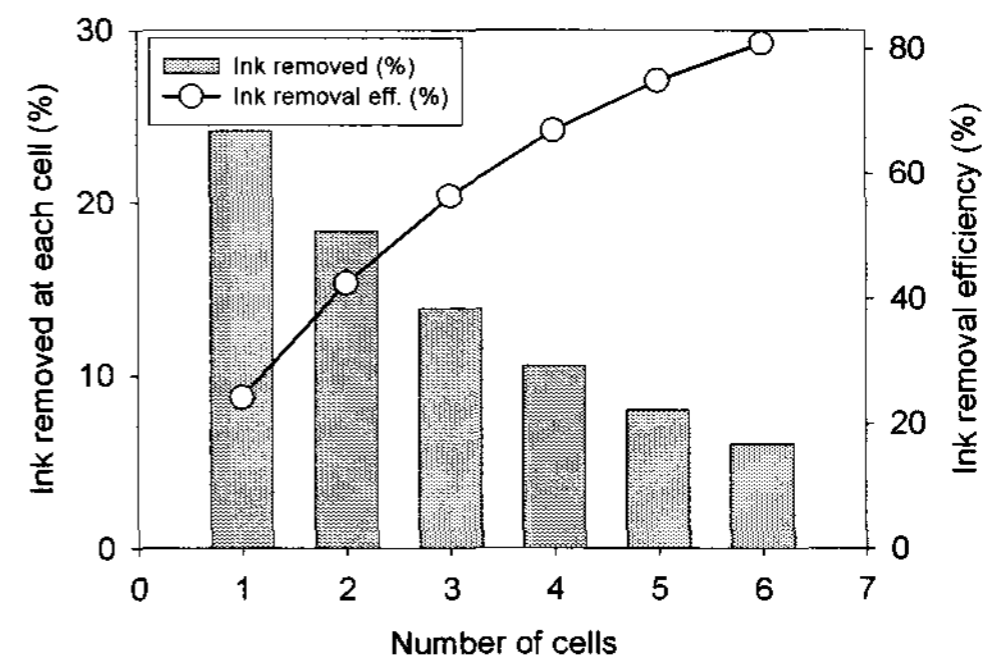


Fig. 3. Effect of number of cells on the ink removal.

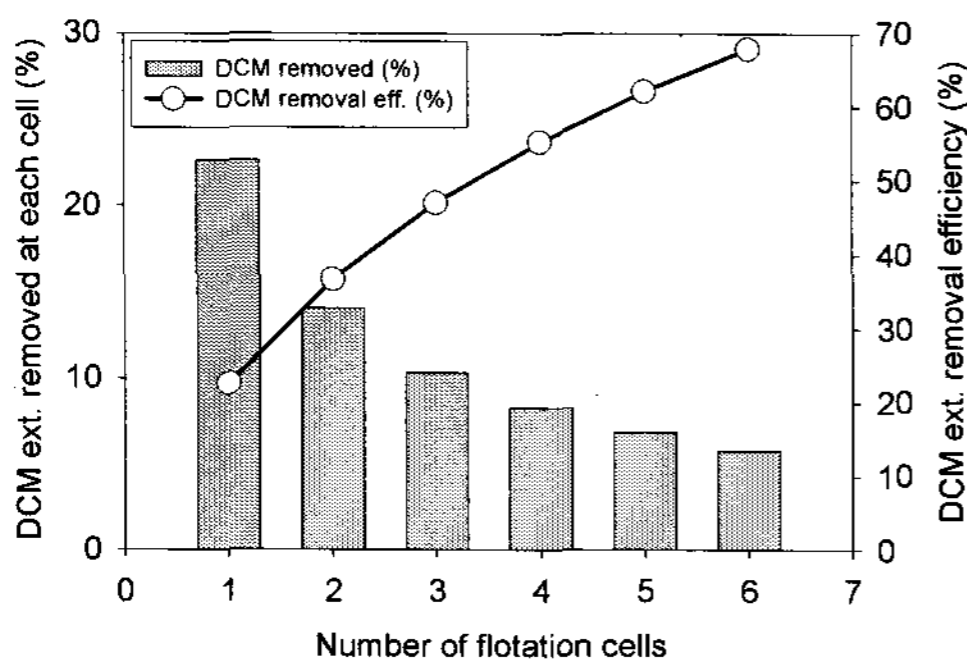


Fig. 4. Effect of number of cells on DCM extractive removal.

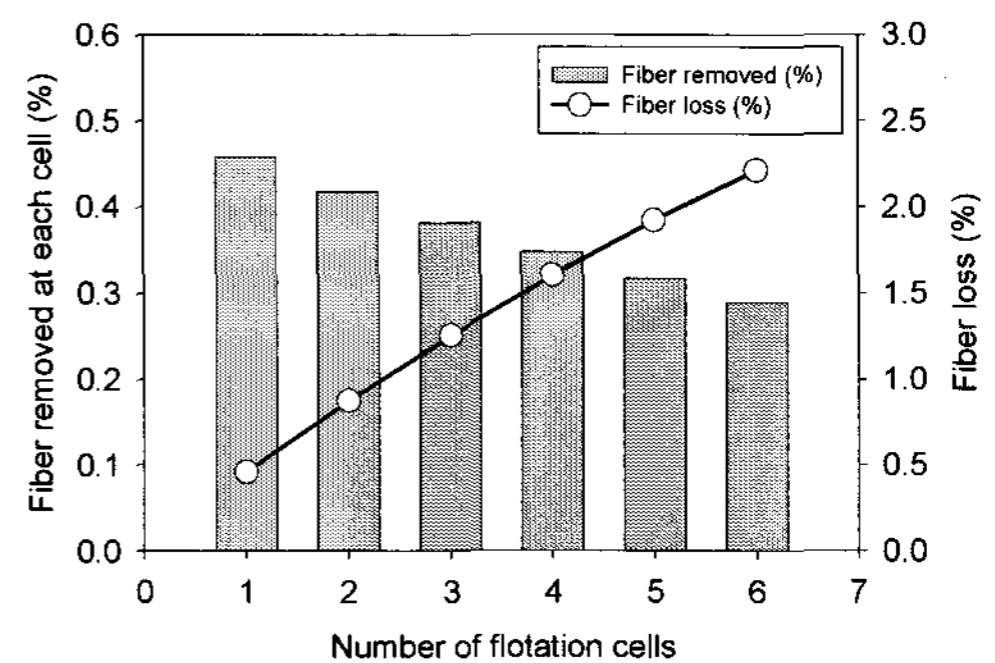


Fig. 5. Effect of number of cells on fiber loss.

잉크는 flotation cell 다섯 개를 통과하면 75%정도가 6개를 통과하면 81%정도가 제거된다(Fig. 3). DCM 추출물은 flotation cell 다섯 개를 통과하면 62%정도가 6개를 통과하면 68%정도가 제거된다(Fig. 4). 잉크와 DCM 추출물은 flotation cell을 늘려감에 따라 각 cell에서 제거되는 물질의 절대량이 점점 감소하는 것을 알 수 있다. Flotation cell의 수가 증가함에 따라 섬유 손실도 증가하였다(Fig. 5). Cell을 6개 통과하였을

시, 섬유는 2.2%정도가 foam reject로 제거되었다.

Fig. 1의 system 2는 flotation 1단에 cell을 5개 배치하고 1단 flotation system을 통과한 것은 accept하여로 다음 공정으로 보내고, 1단에서 배출되는 foam reject를 모아서 2단 flotation에서 2개의 cell을 통과 후, accept된 것은 1단 flotation system의 feed flow로 다시 보내진다. System 1에서 flotation cell 5개만을 통과한 데이터와 system 2를 모사한 결과를 Figs. 6~8에서 비교하였다. System 2가 system 1보다 수율이 더 4%정도 더 높고, 따라서 reject도 적었다 (Fig. 6). Reject의 양이 적기 때문에, ink, DCM 추출물, 충전제의 제거율이 system 1보다 적게 나타났다(Fig. 7). 반면에 섬유의 손실도 1.45%정도 감소하였다 (Fig. 8).

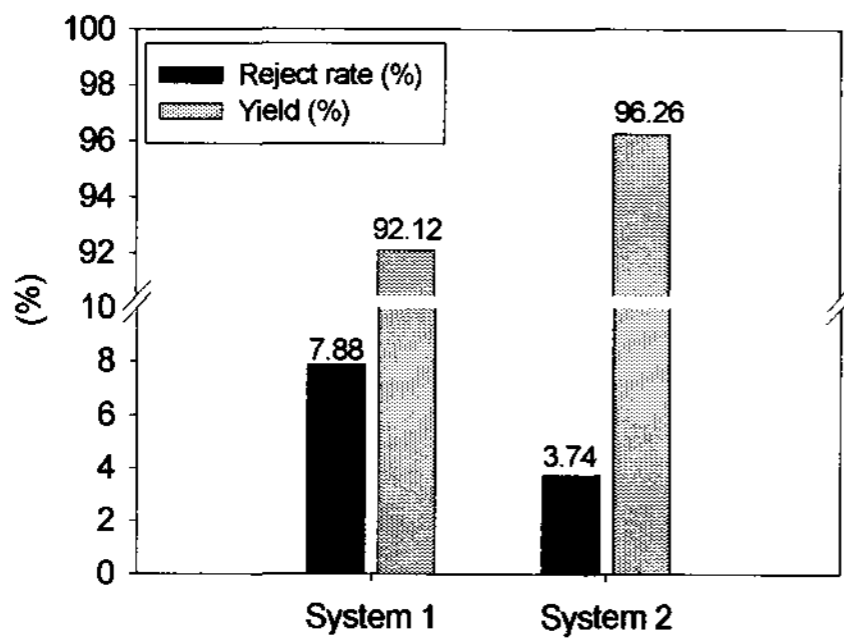


Fig. 6. Effect of 2nd stage flotation cells on yield and reject rate.

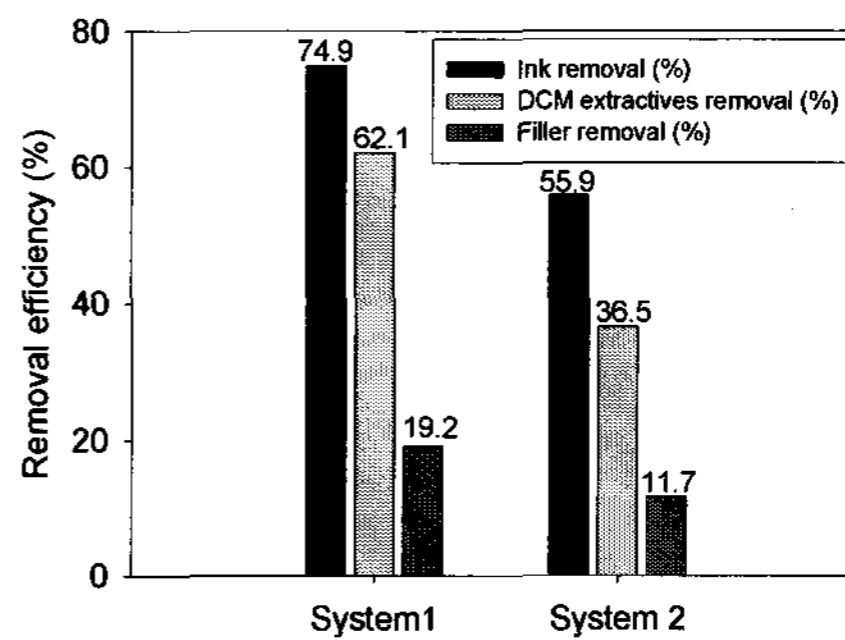


Fig. 7. Effect of 2nd stage flotation cells on ink, DCM ext. and filler removal.

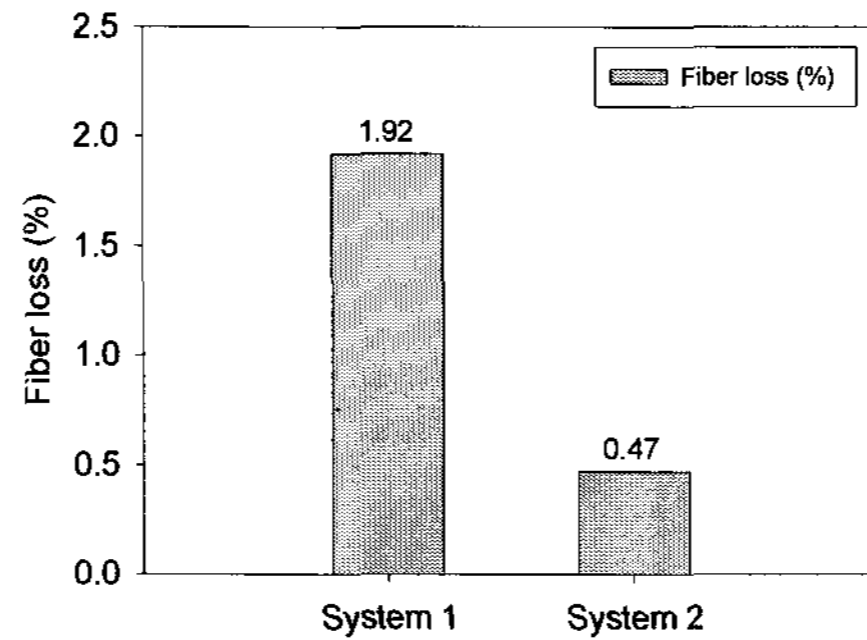


Fig. 8. Effect of 2nd stage flotation cells on fiber loss.

5. 결 론

부상부유 탈묵공정의 최적의 cell 수 및 단(stage)수, 최적의 배열을 찾기 위한 방법으로 물질수지(mass balance) 기술을 사용하여 부상부유 탈묵 시스템을 모델링하였다. 개발된 모델과 실험결과를 이용하여 두 가지 시스템을 전산 모사하였다. 1단 부상부유 시스템에서 flotation cell 수를 늘리면, 수율을 감소하고 reject의 양은 증가한다. 또한 ink, DCM 추출물과 충전제의 제거율은 증가하고 더불어서 섬유의 손실도 증가한다. 1단에서 배출되는 reject를 모아서 2단의 부상부유 공정에서 처리하여 1단의 유입구(feed flow)로 보내 다시 처리하면, 수율은 증가하고 섬유의 손실은 감소한다. 반면에 잉크, DCM 추출물, 충전제의 제거율은 감소하여 더 많은 이물질이 다음 공정으로 넘어가게 된다.

참 고 문 헌

1. Yeo, S.-K., Ji, K.-R., Ryu, J.-Y., Shin, J.-H., Song, B.-K. and Seo, Y.-B., Recycling of wastepaper(IX) - The effect of flotation conditions on the efficiency of KOCC fractionation and principles of fines fractionation, J. Korea TAPPI 32(4):18-26 (2000).

2. Yeo, S.-K., Ryu, J.-Y., Shin, J.-H. and Song, B.-K., Recycling of wastepaper(X) -Improvement of fines fractionation through multi-stage froth-flotation and addition of cationic polyelectrolytes as a fractionating promoter for OCC flotation, J. Korea TAPPI 32(4):27-33 (2000).
3. Yeo, S.-K., Ryu, J.-Y., Shin, J.-H., Song, B.-K. and Seo, Y.-B., Recycling of wastepaper(12) - Froth-flotation conditions for enhancement of fines fractionation selectivity and efficiency, J. Korea TAPPI 33(1):16-23 (2001).
4. Park, D.-S., Optimization of froth-flotation in ONP recycling process through the application of computer simulation, Thesis, Chungnam National University, 2006.