

제지공정 Short Circulation의 동특성 해석

전준석*¹ · 여영구*¹ · 김영곤*² · 강홍*³

(2003년 7월 14일 접수; 2003년 10월 15일 채택)

Analysis of Dynamics of Short Circulation in Paper Mills

Jun Seok Jeon*¹, Yeong-Koo Yeo*¹, Young Gon Kim*² and Hong Kang*³

(Received on July 14, 2003; Accepted on October 15, 2003)

ABSTRACT

Analysis of the elements affecting short circulation in highly integrated paper mills and identification of the interactions among these elements are very important tasks to prevent operational perturbations such as web breaks. In the present work a dynamic model for the short circulation is developed to analyze tuning methods for the outputs to follow set points during grade change operations. Steady state operation data are used to investigate dynamic characteristics of responses for input changes.

Keywords : Short circulation, Dynamic model, Grade change, Interaction, Tuning method

1. 서론

제지공정에서 지료의 화학적·물리적 현상과 공정변수들의 상관 관계를 명백히 규명하는 데에는 어려움이 있다. 그러나 실제 제지공장의 운전에서 지절 현상이나 품질 저하등의 문제점을 미연에 방지하기 위하여 조업자들의 경험과 DCS, QCS등의 데이터를 근거로 하고 있다. 이로써 과거보다는 공장의 생산성 향상과 원가 절감에 상당한 성과를 이루어 왔지만 지절과 품질 저하등의 근본적인 원인은 정확히 알아내지는 못하였다. 본 연구에서는 short circulation 공정을 철저히 분석한 후 제지공장에서 사용되고 있는 유량, 농도, ash, retention aid 등의 관계를 알아 보고자 short circulation 공정의 각 라인별 수치식으로 유추한 정상

상태 데이터를 이용하여 유량, 농도, ash 등을 모사하고 이를 통해 비정상적인 어떤 인자의 영향으로 다른 인자들은 어떤 경향을 나타내는지 분석하였다. 즉 본 연구에서 목표로 하고 있는 것은 제지공정의 wet-end 부분에서 여러 변수들 사이의 상호 작용을 규명함으로써 최소 비용으로 안전하고 효율적인 공정 운전이 이루어지도록 기여하는데 있다. 이를 위해 비선형적인 short circulation의 동특성 공정 모델을 라플라스 변환 후에 Jacobian을 이용하여 전달함수를 유도하였다. 아울러 공정의 외부교란변수나 지종 교체 등과 같은 조건하에서도 평량과 retention이 알맞게 유지되도록 연구했던¹⁾ 이전의 연구결과를 참고로 하여 어떤 인자의 변화에 따라서 다른 인자들이 어떤 변화를 나타내는지 상태공간 모델을 이용하여 분석하였다.

*¹ Department of Chemical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

*² Hankuk Paper co., Ltd., Ulsan 689-892, Korea

*³ J. J. Engineering, Seoul 143-200, Korea

*¹ Correspondence concerning this article should be addressed to Y. K. Yeo [E-mail address: ykyeo@hanyang.ac.kr]

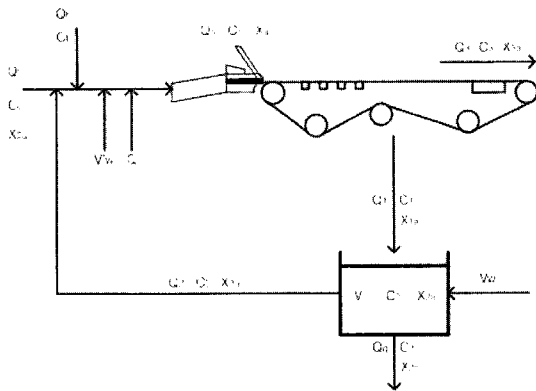


Fig. 1. Schematic of short circulation.

2. Short circulation 모델링

시간에 따른 백수의 농도와 ash 함량의 특성을 정확히 파악하는 것은 매우 어려운 일이다. 본 연구에서는 short circulation에서 thick stock, filler, retention aid, 보충수, 백수 회수유량 등을 주요 변수로 설정하였다. Fig. 1에 일반적인 short circulation 공정을 개략적으로 나타내었으며 주요 변수들의 의미를 Table 1에 요약하였다.

Fig. 1에 보인 바와 같이 일반적인 short circulation공정에서 백수 농도와 ash content에 대한 동적 모델을 정확히 구하는 것은 쉬운 일이 아니다. 여기에

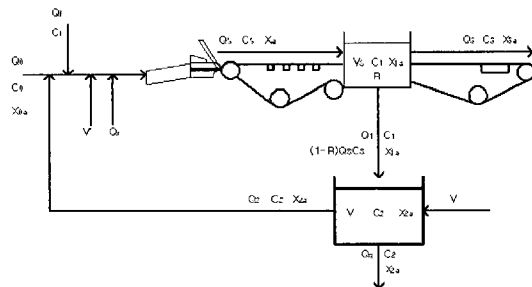


Fig. 2. Schematic of short circulation with imaginary tank.

서는 신뢰성 있는 기대치를 얻어내기 위하여 wire상에 일정한 부피를 가지는 탱크가 존재한다는 가정을 도입하여 일반적인 short circulation 공정에 탱크가 놓여져 있는(Fig. 2 참조) 가상적인 경우를 고려하였다.

물질수지 관계로부터 다음과 같이 동적 모델식을 얻을 수 있다.

$$\text{Headbox 유량: } Q_s = Q_2 + Q_f + V'_w + Q_r \quad [1]$$

Q_s : headbox에서 wire로 나가는 유량, l /min

Q_2 : 백수의 회수 유량(순환 유량), l /min

Q_0 : thick stock의 유량, l /min

Q_f : filler의 유량, l /min

V'_w : 보충수 유량(청수), l /min

Q_r : retention aid 유량, l /min

$$\text{Headbox 농도: } C_s = \frac{Q_0 C_0 + Q_2 C_2 + Q_f C_f}{Q_s} \quad [2]$$

C_s : headbox의 농도, %

C_0 : thick stock의 농도, %

C_2 : silo의 농도, %

C_f : filler의 농도, %

$$\text{Headbox ash content: } X_s = \frac{Q_0 C_0 X_{0a} + Q_2 C_2 X_{2a} + Q_f C_f}{Q_s C_s} \quad [3]$$

X_s : headbox의 ash content, %

X_{0a} : thick stock의 ash content, %

X_{2a} : silo의 ash content, %

$$\text{백수 농도: } \frac{dC_1}{dt} = \frac{Q_s C_s - Q_3 C_3 - Q_f C_f}{V_s} \quad [4]$$

C_1 : 백수의 농도, %

Q_3 : short circulation이후 wire상에 남아 있는 유량, l /min

C_3 : short circulation이후 wire상에 남아 있는 농도, %

Q_f : short circulation에서 silo로 떨어지는 유량(백수 유량), l /min

V_s : wire상 가상 tank의 부피, l

Table 1. Description of major variables

Sections	Thick stock	Filler	S.W	R.aid	Headbox	White water	Silo
Flow(l /min)	Q_0	Q_f	V'_w	V_w	Q_s	Q_1	Q_2 Q_3
Cons.(%)	C_0	C_f	.	.	C_s	C_1	C_2
Ash(%)	X_{0a}	.	.	.	X_s	X_{1a}	X_{2a}

(Cons. : Consistency, Ash : Ash content, S.W. : Supplementary water, R.aid : Retention aid)

위의 백수 농도식에서 wire상의 부피(VS)는 실제로 없기 때문에 그 크기를 "1"로 두어 모델식을 풀이하였다.

백수의 ash content :

$$\frac{dX_{1a}}{dt} = \frac{Q_3 C_s X_a - Q_3 C_3 X_{3a} - Q_s C_s X_{1a} + Q_3 C_3 X_{1a}}{V_s C_1} \quad [5]$$

X_{1a} : silo에서의 ash content, %

X_{3a} : short circulation이후 wire상에 남아 있는 ash content, %

$$\text{Silo 농도} : \frac{dC_2}{dt} = \frac{Q_1 C_1 - Q_1 C_2 - V_w C_2}{V} \quad [6]$$

V_w : 보충수 유량(세척수), ℓ /min

V : silo의 부피, ℓ

Silo ash content :

$$\frac{dX_{2a}}{dt} = \frac{Q_1 C_1 X_{1a} - 2Q_1 C_1 X_{2a} + Q_2 C_2 X_{2a} + Q_q C_2 X_{2a}}{2C_2 V} \quad [7]$$

Q_q : silo에서 계외로 나가는 유량, ℓ /min

Silo의 경우 실제 공정에서는 부피 변화가 거의 없지만 외부 변수의 영향을 파악하기 위하여 다음 관계를 이용하였다.

$$\text{Silo 부피} : \frac{dV}{dt} = Q_1 + V_w - Q_2 - Q_q \quad [8]$$

위의 식[1] 및 [3]으로부터 solid OPR(One Pass Retention : short circulation retention)과 ash OPR을 구하면 다음과 같다.

$$R = 1 - \frac{C_i}{C_s} \quad [9]$$

R : solid OPR

$$R_a = 1 - \frac{C_i X_{1a}}{C_s X_a} \quad [10]$$

R_a : ash OPR

위의 모델식에 사용된 보충수(V'_w , V_w)는 실제 공장의 데이터로 나와 있지는 않지만 보다 정확한 수치를 유도하기 위해서 추가하였다. 즉 위의 모델식 [1], [6], [8]에 명시된 보충수 V'_w 는 청수의 양이고, V_w 는 세척수의 양을 나타낸다. 모델식 [9]에서 얻어지는 OPR은 retention aid 양을 제어하는 지표가 되는데 retention aid 양이 적절하게 제어되지 않을 경우에는 지질

과 같은 문제가 발생하기도 하며 제품의 질에도 영향을 끼치는 만큼 그 유량이 최적의 상태로 유지되어야 하는 요소이다. 즉, 공정상에서 정확한 OPR 수치가 매우 중요한 요소이므로 이의 특성을 잘 나타내어주는 식을 통하여 정확한 값을 규명하는 것이 매우 중요하다. 그러므로 OPR의 수치를 정확하게 유추하여야 할 필요가 있는 것이다. 하지만 제지공장에서 실시간으로 농도를 측정하는 장비인 농도 센서로는 wire에서 silo로 떨어지는 백수의 농도를 바로 측정 할 수 없기 때문에 근사치인 silo의 농도를 이용하고 있다. 이를 이용하여도 공정을 파악하고 제어하는데 무리는 없었으나 silo로 유입되는 세척수 등의 인자를 고려 해 볼 때 엄밀한 의미에서는 차이가 있다. 그래서 여기서는 더욱 정확한 OPR수치를 유도하기 위하여 Fig. 2 에서와 같은 wire상의 가상의 탱크를 가정하여 여기서 유도한 백수의 농도(C_1)을 이용한 것이다. 이를 통해 retention aid의 최적의 수치로 OPR에 영향을 주어 원료비용 뿐만 아니라 품질 향상에도 도움이 될 것이다.

위의 모델식에서 미지수는 모두(Q_2 , Q_s , C_s , X_a , Q_1 , C_1 , X_{1a} , C_2 , X_{2a} , V , Q_q) 11개이다. 여기에서 Q_2 는 백수의 회수 유량으로서 이를 구하기 위해 총괄 물질수지를 이용하였다. Q_2 를 계산하기 위해서는 초기값이 필요한데, 적당한 초기값을 설정해준 후 오차범위 내에서 유효 수치가 나오도록 계산을 수행하였다. 이로부터 얻은 Q_2 를 이용하여 headbox의 유량(Q_0)을 얻을 수 있다.

$$\text{총괄 물질수지} : Q_0 C_0 + Q_f C_f = Q_3 C_3 + Q_q C_2 \quad [11]$$

백수의 회수 유량 :

$$Q_2 = \frac{Q_0 C_0 + Q_f C_f - Q_3 C_3}{0.15 C_2} - (Q_0 + Q_f + V'_w + Q_r + Q_3 + V_w) \quad [12]$$

Silo 수치를 구하기 위해서는 Q_q 가 필요하다. Q_q 는 공정 상황에 따라 약간의 차이가 나타나겠지만 다음 관계식을 이용하였다.

$$Q_q = 0.15(Q_i + V_w) \quad [13]$$

본 연구에서 구한 모델식의 입력변수와 출력변수의 관계를 살펴보면 전형적인 MIMO(Multi-Input Multi-Output)형태로서 이러한 시스템을 전달함수로 표현하려면 매우 복잡하다. 이 경우 입력과 출력과의 관계를 시간 영역에서 나타낼 수 있는데, 이것이 상태공간 모델이다. 이를 통해 전달함수를 3개의 입력변수(thick stock의 유량(Q_0), 농도(C_0), ash con-

tent(X_{0a})와 5개의 출력변수(백수 농도(C_1), silo 농도(C_2), silo 부피(V), 백수의 ash content(X_{1a}), silo ash content(X_{2a}))로 전개하였다. Short circulation에 대한 2×2 형태의 전달함수는 입력변수를 filler, thick stock으로 설정하고 출력변수를 ash content, dry weight로 하여 이미 발표된 바 있다.²⁾ 본 연구에서는 thick stock의 유량, 농도, ash content를 입력변수로 하고 step변환을 주어 출력변수의 변화를 분석하였다. 이렇게 구한 전달함수(3개 입력변수, 5개 출력변수)는 다음과 같다.

$$X' = \begin{bmatrix} C_1' \\ C_2' \\ V' \\ X_{1a}' \\ X_{2a}' \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ V \\ X_{1a} \\ X_{2a} \end{bmatrix} + B \begin{bmatrix} Q_0 \\ C_0 \\ X_{0a} \end{bmatrix}, \quad Y = C \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ V \\ X_{1a} \\ X_{2a} \end{bmatrix} + D \begin{bmatrix} Q_0 \\ C_0 \\ X_{0a} \end{bmatrix} = CX + DU$$

$$Y(S) = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} \\ G_{41} & G_{42} & G_{43} \\ G_{51} & G_{52} & G_{53} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_0 \\ C_0 \\ X_{0a} \end{bmatrix} = G(S)U(S) \quad [14]$$

위의 상태 공간 모델에서 C는 단위 행렬이고 D는 영행렬로 설정한 후 계산되었다. 전달함수($G(S)$)는 다음과 같이 모델식의 라플라스 변환으로부터 얻을 수 있다.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = C(sI - A)^{-1}B + D$$

위에서 $G_{ji}(S)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = C(sI - A)^{-1}B + D \quad [15]$$

$$G_{11} = \frac{3.078 S^2 + 1.544 S - 4.441e-009}{S^3 + 4.91e004 S^2 + 3689 S}$$

$$G_{21} = \frac{6.235e-008 S^2 + 1.514 S - 5.121e-009}{S^3 + 4.91e004 S^2 + 3689 S}$$

$$G_{31} = \frac{0.85}{S}$$

$$G_{41} = \frac{-8.646 S^4 - 4.246e005 S^3 - 2.442e005 S^2 - 8610 S + 0.01536}{S^5 + 9.819e004 S^4 + 2.41e009 S^3 + 2.717e008 S^2 + 6.805e006 S}$$

$$G_{51} = \frac{-4.12e-006 S^4 - 4.907 S^3 - 2.31e005 S^2 - 8720 S + 0.01807}{S^5 + 9.819e004 S^4 + 2.41e009 S^3 + 2.717e008 S^2 + 6.805e006 S}$$

$$G_{12} = \frac{5890 S + 2951}{S^2 + 4.91e004 S + 3689}$$

$$G_{22} = \frac{2892}{S^2 + 4.91e004 S + 3689}$$

$$G_{32} = 0$$

$$G_{42} = \frac{-1.502e004 S^3 - 7.377e008 S^2 - 4.268e008 S - 1.388e007}{S^4 + 9.819e004 S^3 + 2.41e009 S^2 + 2.717e008 S + 6.805e006}$$

$$G_{52} = \frac{-8235 S^2 - 4.043e008 S - 1.388e007}{S^4 + 9.819e004 S^3 + 2.41e009 S^2 + 2.717e008 S + 6.805e006}$$

$$G_{13} = 0$$

$$G_{23} = 0$$

$$G_{33} = 0$$

$$G_{43} = \frac{6.393e004 S + 1.601e004}{S^2 + 4.91e004 S + 1845}$$

$$G_{53} = \frac{1.601e004}{S^2 + 4.91e004 S + 1845}$$

3. 결과 및 고찰

기존의 연구 결과들로부터 short circulation의 물 질수지식을 이용하여 이론적 분석을 한 것과³⁾, short circulation이후 wire상 농도(C_3)와 thick stock의 농도(C_4)의 비율이 3가지 요소(OPR, silo의 부피(V), 백수의 회수 유량(Q_{22}))의 함수라는 접근 방법으로 OPR의 영향에 따른 농도비를 분석함으로써⁴⁾ OPR 제어의 중요성을 확인시켜 준 결과를 찾아 볼 수 있다. 이 연구 결과들은 인자들 간의 관계를 수학적으로 표현해 주기는 하였으나 실제 공정의 모든 인자를 고려한 상태공간 모델을 이용하여 전달함수를 유도해 내지는 못하였다. 그밖에 실제 공정에서 사용된 데이터를 비교 분석하여 농도, ash, retention 등의 상관 관계를 모식화한 연구도 발표되었다.^{5, 6)}

여기에서는 short circulation공정을 정확하게 분석한 후에 실측하여 구한 데이터와 몇가지 인자(cleaner와 screen의 효율식, 펌프 특성 곡선을 분석한 회귀식)들로 각 장치와 라인의 유량, 농도를 역산법을 통해 규명하였다(Table 2). 이를 위해서 정상상태 운전 데이터가 이용되었다. Fig. 3은 주요 입력변수의 변화에 대한 출력변수의 변화를 보인 것이다. 계산 결과 응답은 정상상태 데이터와 거의 일치했으나 백수와 silo 농도가 약 0.1%의 오차가 남을 확인할 수 있었다. 이에 따라 headbox와 백수(혹은 silo농도)농도의 함수인 OPR도 약 0.1의 차이를 보였다. 이는 short circulation의 개념 설정의 차이에서 비롯되는 오차로서 정상상태 데이터는 OPR수치가 인위적으로 정해진 wire상의 한 지점에 대해서 구해진 반면 위의 모델식으로 모사된 결과는 수치적 계산을 통해서 wire상의 농도와 silo로 떨어지는 백수의 농도가 같아지는 지점에 대한 정상상태 값이다. 그러므로 데이터 수치의 신뢰성(보충수는 실측이 안됨)과 실제 공정에서의 외부 교란변수를 고려해 볼 때 충분히 허용 될 수 있는 오차임을 알 수 있다. 그리고 제지공장에서 사용하고 있는 OPR수치 계산법이 Headbox와 silo농도를 측정하여 구하여지는데 이를 이용하여도 충분히 공정을 분석하

Table 2. Data used in the simulation

Sections		Thick stock R.aid			Filler		S.W.		To press		
Data	Flow	Cons.	Ash	Flow	Flow	Cons.	V'w	Vw	Flow	Cons.	Ash
	(ℓ /min)	(%)	(%)	(ℓ /min)	(ℓ /min)	(%)	(ℓ /min)	(ℓ /min)	(ℓ /min)	(%)	(%)
	5890	3.39	0.15	80.4	97	35	1500	1000	1053	20	0.2

(Cons. : Consistency, Ash : Ash content, S.W. : Supplementary water, R.aid : Retention aid)

고 제어하는데 무리가 없음을 Fig. 3 의 백수의 농도 (C_1)와 silo의 농도(C_2)의 수치가 비슷하다는 것으로 알 수 있었다. 또한 유도한 전달함수를 통해 각 입력변수들의 영향이 출력변수들에 어떤 영향을 주는지 알아 보기 위하여 입력변수에 step변화를 가하였다. Fig. 4 는 유량(Q_0)에 1000의 step변화를 주었을 때 각 출력 변수의 경향을 순서대로 모사한 것이고 Fig. 5는 농도 (C_0), Fig. 6은 ash content(X_{0a})에 각각 unit step을 도입한 후 인자들간의 관계를 도시한 것이다. Thick stock 유량(Q_0)은 5개의 출력변수들에 영향을 고루 주

었지만, thick stock 농도(C_0)는 silo 부피(V)변화에, thick stock ash content(X_{0a})는 백수의 농도(C_1), silo 농도(C_2), silo 부피(V)에 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있다. 또한 어떤 출력변수들의 경향을 보면 물리적으로 맞지 않는 음수의 수치를 나타내는 부분이 있는데 이로부터 thick stock의 유량, 농도, ash content를 변화시켜 줄 때 한 요소만 조절하게 되면 출력변수의 어느 수치가 적절치 않게 변화하기 때문에 지절 현상이 일어날 수 있고, 혹 지절이 일어나지 않더라도 최종 제품의 질이 저하될 수 있다는 것을 알 수

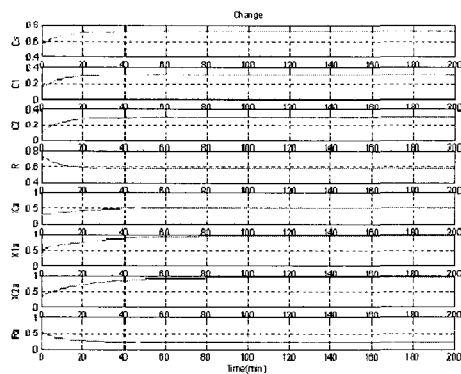


Fig. 3. Responses of output variables.

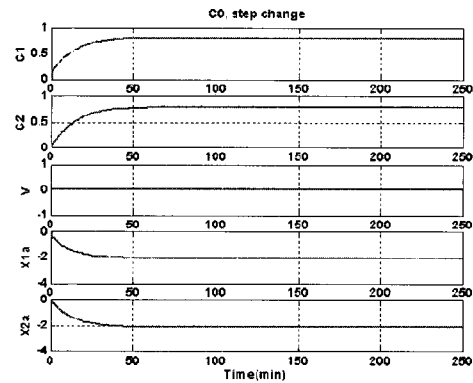


Fig. 5. Step responses of the consistency C_0 .

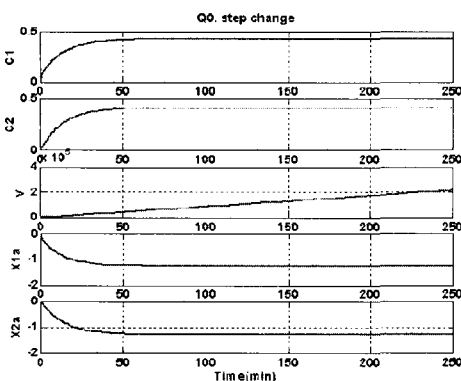


Fig. 4. Step responses of the flow Q_0 .

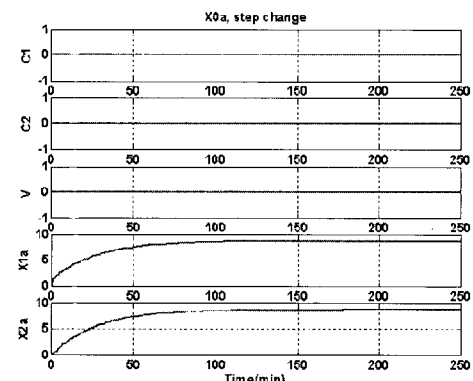


Fig. 6. Step responses of the ash content X_{0a} .

있다. 즉 우리가 원하는 출력변수를 얻기 위해서는 각 입력변수의 영향을 고려하여 각각의 적당한 변화가 동시에 일어나야 한다는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

Short circulation의 모델을 구하기 위해서는 백수의 농도를 알아야만 하는데 시간의 변화에 따른 백수 농도의 경향을 수학적으로 표현하기는 쉬운 일이 아니다. 입력변수들로 설정된 headbox이전의 데이터들(thick stock, filler, retention aid, 보충수, 백수의 회수(순환량))로 wire에서의 변화 특성(백수의 농도, ash content)을 분석 하기 위해서 wire상에 일정한 부피(VS)를 가지는 탱크가 존재 한다는 가정을 도입하였다. 이로부터 얻은 입차 상미분 형태의 백수의 농도와 ash content를 나타내는 식은 어느 순간에는 wire상의 수치와 silo로 떨어지는 백수의 수치가 같아지는 반면, 가상의 탱크 안은 retention의 작용으로(retention aid의 화학적 작용) short circulation 이후의 농도는 탱크 내부와 다르게 된다.

얻어진 비선형 모델식들을 선형화 시킨 다음 리플라스 변환을 이용하여 입력변수 3개, 출력변수 5개인 전

달함수로 전개하였다. 또한 thick stock의 변화에 따른 출력변수들의 경향을 분석해 보기위하여 입력변수로서 thick stock 유량을 사용하였다. 유량은 부피, 농도, ash content 모두에 영향을 주고 있음을 알 수 있었고 농도와 ash content도 몇몇 인자들을 제외하곤 출력변수에 민감하게 반응함을 확인할 수 있었다.

인용 문헌

1. Orccotoma, J. A., Paris, J., and Perrier, M., Journal of process control, 11(4):401 (2001).
2. Isaksson, A. J., Hagberg, M., and Jonsson, L. E., Control engineering practice, 3(10):1491 (1995).
3. Mardon, J., Jackson, M. and Serenius, R., Appita J., 25(1): 45 (1971).
4. Norman, Bo., EUCEPA 1990 Print Paper and Board Products for Printing in the Nineties Conference Proceedings, EUCEPA, Paris, p. 217
5. Artama, M., Nokelainen, J., Paper Technology, 38(8):33 (1997).
6. Rantala, T., Tarhonen, P., and Koivo, H. N., Tappi J., 77(12):125 (1994).