

제지공장의 Short Circulation 공정의 모델링

Modeling of Short Circulation in Paper Mills

전준석¹⁾, 여영구¹⁾, 김영곤²⁾, 강홍³⁾

1) 한양대학교 화학공학과 · 2) 한국제지 · 3) J-J컨설팅

요 약

지종교체시 지절현상등의 사고를 방지하기 위하여 short circulation에 영향을 주는 요소들을 분석하고 이들 상호간의 관계를 파악하는 것은 매우 중요하다.

본 연구에서는 공정 출력변수가 원하는 값으로 유지되기 위해서 입력변수를 어떻게 조절해 주어야 하는지를 규명하기 위하여 short circulation에 대한 동적 모델식을 구한 후 정상상태 운전 데이터를 이용하여 입력변수의 변화에 따른 응답 특성을 조사하였고 아울러 입력변수들의 상호작용 특성을 규명하였다.

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.

1. 서론

제지공장의 운전에서 지절 현상이나 품질 저하등의 문제점을 미연에 방지하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 이들 문제점의 원인을 사전에 파악하기 위하여 제지공정의 wet-end 부분에서 여러 변수들 사이의 상호 작용을 규명함으로써 최소 비용으로 안전하고 효율적인 공정 운전이 이루어지도록 하였다. 또한, 공정의 외부교란변수나 지종 교체 등과 같은 조건하에서도 평량과 retention이 알맞게 유지되도록 연구했던¹⁾ 내용을 참고로 입력변수를 어떻게 조절해 주어야 하는지도 알아 보았다. 현재 short circulation 공정의 운전에서는 정확한 제어가 제대로 이루어 지지 않고 있는데 이는 head box와 백수(혹은 silo)에서 측정된 데이터에 대한 신뢰성과 입력변수로 주어진 수치들의 정확성이 불확실 하기 때문인 경우가 많다. 따라서 short circulation의 동특성을 좀 더 명확하게 규명하기 위하여 실제 공장에서 사용되는 모든 조업 인자들을 두루 고려하였고 얻어진 모델식을 상태공간 모델로 변형한 후 얻어진 전달함수를 이용하여 입력변수 변화에 따른 출력변수의 변화를 분석하였다.

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. 여기에서는 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.

$$\text{Head box의 유량: } Q_0 = Q_2 + Q_0 + Q_f + V' \cdot v + Q_c$$

[1]

Q_s : head box에서 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, ℓ/min

Q_r : retention aid 유량, ℓ/min

$$\text{Head box 농도} : C_s = \frac{Q_0 C_0 + Q_2 C_2 + Q_f C_f}{Q_s}$$

[2]

C_s : head box의 농도, %

C_0 : thick stock의 농도, %

C_2 : silo의 농도, %

C_f : filler의 농도, %

$$\text{Head box ash content} : X_a = \frac{Q_0 C_0 X_{0a} + Q_2 C_2 X_{2a} + Q_f C_f}{Q_s C_s}$$

[3]

X_a : head box의 ash content, %

X_{0a} : thick stock의 ash content, %

X_{2a} : silo의 ash content, %

$$\text{백수 농도} : \frac{dC_1}{dt} = \frac{Q_s C_s - Q_3 C_3 - Q_1 C_1}{V_s}$$

[4]

C_1 : 백수의 농도, %

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

C_3 : short circulation이후 wire상에 남아 있는 농도, %

Q_1 : short circulation에서 silo로 떨어지는 유량(백수 유량), ℓ/min

V_s : wire상 가상 tank의 부피, 1ℓ

위의 백수 농도식에서 wire상의 부피(VS)는 실제로 없기 때문에 그 크기를 “1” 로

두어 모델식을 풀이하였다.

$$\text{백수의 ash content} : \frac{dX_{1a}}{dt} = \frac{Q_5 C_5 X_a - Q_3 C_3 X_{3a} - Q_3 C_3 X_{1a} + Q_3 C_3 X_{1a}}{V_3 C_1}$$

[5]

X_{1a} : silo에서의 ash content, %

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

$$\text{Silo농도} : \frac{dC_2}{dt} = \frac{Q_1 C_1 - Q_1 C_2 - V_w C_2}{V}$$

[6]

V_w : 보충수 유량, ℓ /min

V : silo의 부피, ℓ

$$\text{Silo ash content} : \frac{dX_{2a}}{dt} = \frac{Q_1 C_1 X_{1a} - 2Q_1 C_1 X_{2a} + Q_2 C_2 X_{2a} + Q_2 C_2 X_{2a}}{2C_2 V}$$

[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.

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

[8]

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

$$R = 1 - \frac{C_1}{C_s}$$

[9]

R : solid OPR

$$R_a = 1 - \frac{C_1 X_{1a}}{C_s X_a}$$

[10]

R_a : ash OPR

위에서 얻어지는 OPR은 retention aid 양을 제어하는 지표가 된다. Retention aid 양이 적절하게 제어되지 않을 경우에는 지절과 같은 문제가 발생하기도 하며 제품의 질에도 영향을 끼치는 만큼 그 유량이 최적의 상태로 유지되어야 할 것이다. 즉 공정상에서 정확한 OPR 수치가 매우 중요한 요소이므로 이의 특성을 잘 나타내어주는 식을 통하여 정확한 값을 규명하는 것이 매우 중요하다.

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 head box의 유량(Q_S)을 얻을 수 있다.

$$\text{총괄 물질수지: } Q_0C_0 + Q_C C_f = Q_3C_3 + Q_q C_2$$

[11]

$$\text{백수의 회수 유량: } Q_2 = \frac{Q_0C_0 + Q_C C_f - Q_3C_3}{0.15C_2} - (Q_0 + Q_f + V_w + Q_r - Q_3 + V_w)$$

[12]

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

$$Q_q = 0.15(Q_1 + V_w)$$

[13]

본 연구에서 얻은 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 content(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 2×2형태의 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 분석하

였다. 이렇게 구한 전달함수(3개 입력변수, 5개 출력변수)는 다음과 같다.

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

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

[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.

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

[15]

위에서 $G_{ji}(S)$ 는 다음과 같이 주어진다.

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

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

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

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

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

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

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

$$G_{32} = 0$$

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

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

$$G_{13} = 0$$

$$G_{23} = 0$$

$$G_{33} = 0$$

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

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

3. 결과 및 고찰

기존의 연구 결과들로부터 short circulation의 물질수지식을 이용하여 이론적 분석을 한 것과³⁾, short circulation이후 wire상 농도(Q₃)와 thick stock의 농도(Q₀)의 비율이 3가지 요소(OPR, silo의 부피(V), 백수의 회수 유량(Q₂))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 운

전 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 head box와 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 외부교란변수를 고려해 볼 때 충분히 허용 될 수 있는 오차임을 알 수 있다.

각 입력변수들의 영향이 출력변수들에 어떤 영향을 주는지 알아보기 위하여 입력변수에 step변화를 가하였다. Fig. 4는 유량(Q_0)에 1000의 step변화를 주었을 때 각 출력변수의 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 주었지만, 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 있다. 즉 우리가 원하는 출력변수를 얻기 위해서는 각 입력변수의 영향을 고려하여 각각의 적당한 변화가 동시에 일어나야 한다는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

Short circulation의 모델을 구하기 위해서는 백수의 농도를 알아야만 하는데 시간의 변화에 따른 백수 농도의 경향을 수학적으로 표현하기는 쉬운 일이 아니다. 입력변수들로 설정된 head box이전의 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(V_s)를 가지는 탱크가 존재 한다는 가정을 도입하였다. 이로부터 얻은 일차 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 라플라스 변환을 이용하여 입력변수 3개, 출력변수 5개인 전달함수로 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.

인용문헌

1. Orcotoma, 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).

Table 1. Description of major variables

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

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

Table 2. Data used in the simulation

Section	Thick stock			R.aid	Filler			S.W.		To press		
	Flow (ℓ/min)	Cons. (%)	Ash (%)	Flow (ℓ/min)	Flow (ℓ/min)	Cons. (%)	V'_w (ℓ)	V_w (ℓ)	Flow (ℓ/min)	Cons. (%)	Ash (%)	
Data	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)

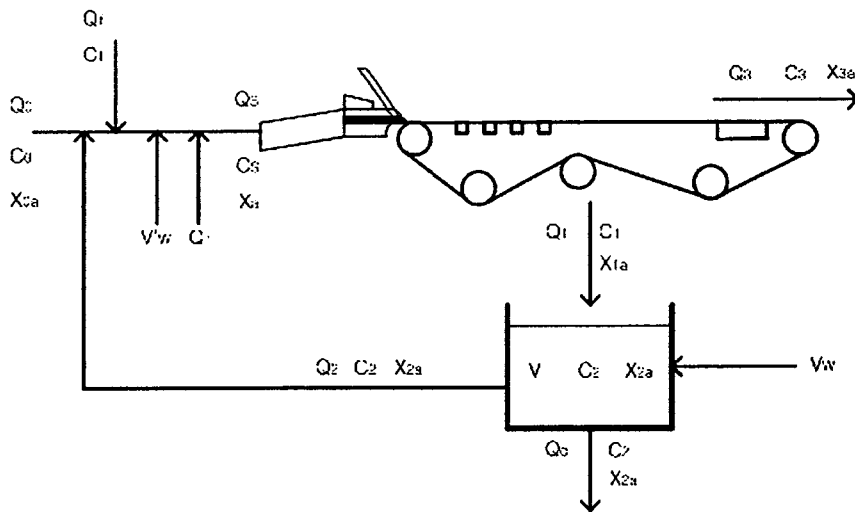


Figure. 1 . Schematic of short circulation

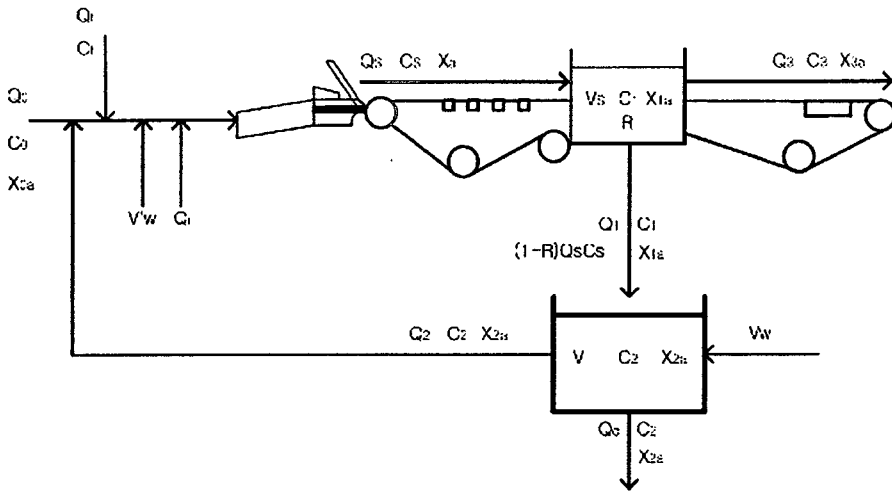


Figure. 2 . Schematic of short circulation with imaginary tank

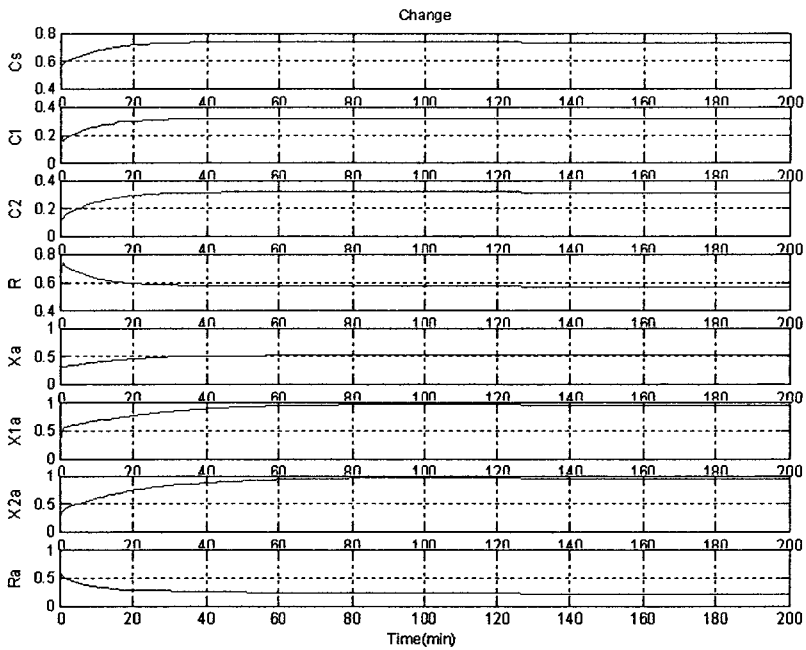


Figure. 3 . Responses of output variables

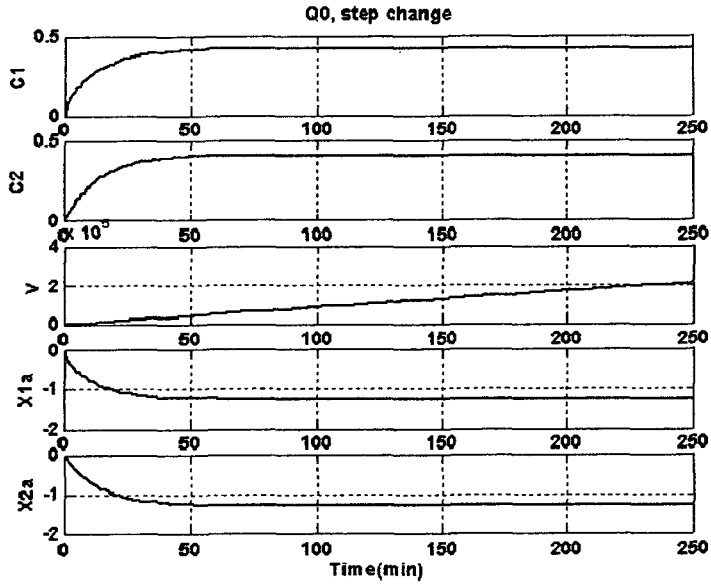


Figure. 4 . Step responses of the flow Q_0

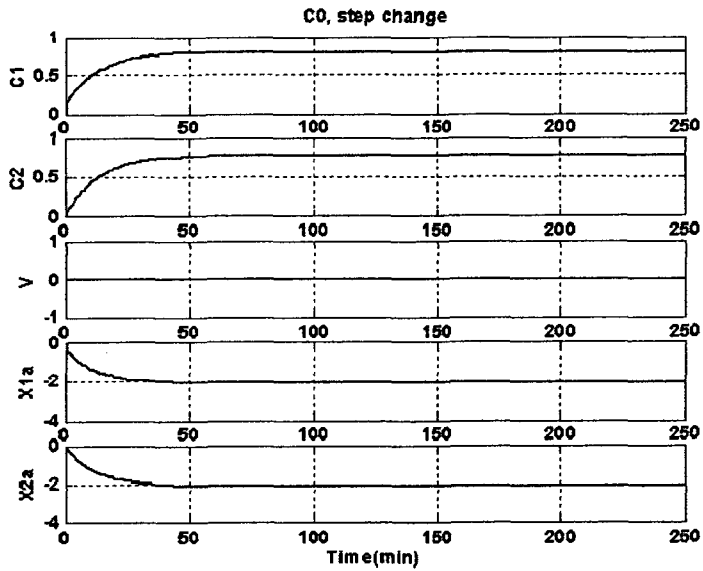


Figure. 5 . Step responses of the consistency C_0

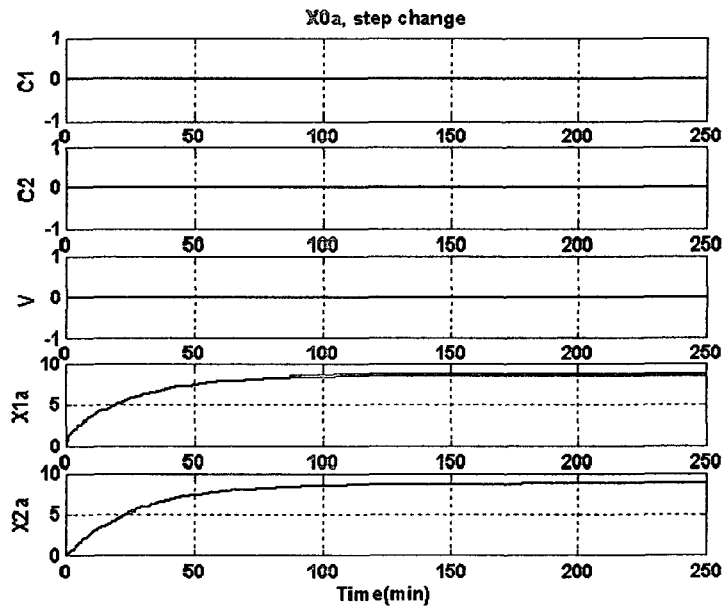


Figure. 6 . Step responses of the ash content X_{0a}