

붕소동위체분리공정의 수학적모형화와 계산

김승철, 김충혁

위대한 수령 김일성 동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《...원자력부문의 과학자들이 원자력에 대한 연구사업을 더 적극적으로 하도록 하여야 합니다.》(《김일성전집》 제60권 352페이지)

오늘 주체적인 원자력공업을 발전시키는데서 나서는 중요한 문제의 하나는 나라의 핵동력공업발전에서 요구되는 여러가지 재료들을 자체의 힘으로 해결해나가는것이다. 특히 원자로조종봉과 중성자방어재료, 암치료제로 쓰이고있는 ^{10}B [1, 2]을 대량적으로 분리하는것이 매우 중요하다.

우리는 붕소동위체분리공정에 대한 수학적모형화를 진행하고 분리공정에 영향을 미치는 몇가지 분리인자들에 대한 이론적계산을 하였다.

1. 수학적모형화

붕소동위체분리공정의 흐름도는 그림 1과 같다.

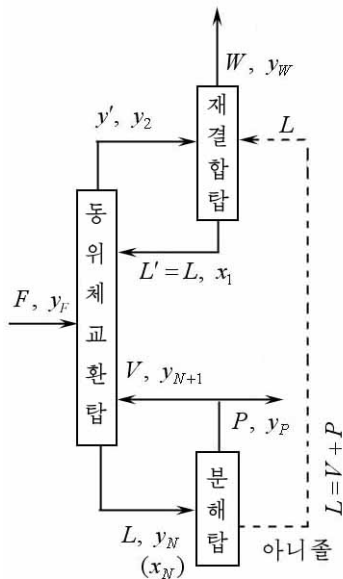


그림 1. 붕소동위체분리공정의 흐름도

기본가정

- ① 탑의 매 단에서 기상, 액상의 농도는 균일하다.
- ② 교환반응은 액상에서 일어난다.
- ③ 액상에서 모든 아니줄은 착화합물로 존재한다.
- ④ 탑의 매 단에서 액상은 화학적평형상태에 있다.
- ⑤ 과정은 안정상태에 있다.
- ⑥ 온도가 일정한 조건에서 작업한다.

농축탑과 빈화탑 및 전체 탑에서 물질바란스식을 고려하면 다음과 같다.

$$L = P + V, \quad L + W = F + V, \quad F = P + W, \quad Fy_f = Wy_n + Py_p$$

농축단의 이론모형 농축단의 j 번째 단에서 수학적모형(간단하게 계산하기 위하여 출구와 열교환은 고려하지 않았다.)은 그림 2와 같다.

j 번째 단의 물질바란스방정식은 다음과 같다.(이때 i 성분은 목적하는 ^{10}B 성분이므로 표시할수도 있고 안할수도 있다.)

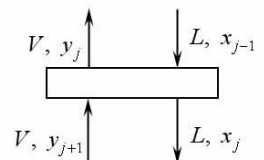


그림 2. 농축단에서 흐름모형

$$Vy_{j+1} + Lx_{j-1} - Vy_j - Lx_j = 0 \quad (j = N_F + 1, N_F + 2, \dots, N - 1)$$

$$Lx_N - Vy_{N+1} - Py_{N+1} = 0 \quad (j = N)$$

원료공급단의 이론모형 공급단의 j 번째 단에서 수학적모형은 그림 3과 같다.

원료공급단의 물질바란스방정식은 다음과 같다.

$$Fy_F + (V + L)x_{j+1} - (V + F)y_j - Lx_j = 0$$

여기서 가정 ①로부터 $y_{i, j-i} = x_{i, j+i}$, F 는 공급기체이다.

빈화단의 이론모형 빈화단의 j 번째 단에서 수학적모형은 그림

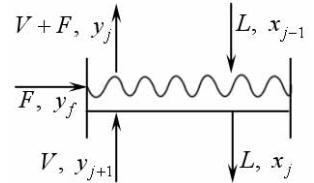


그림 3. 공급단에서 흐름모형

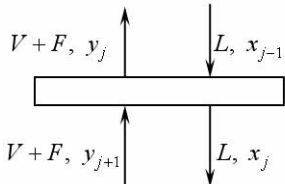


그림 4. 빈화단에서 흐름모형

4와 같다.

j 번째 빈화단의 물질바란스방정식은 다음과 같다.

$$(V + F)y_2 - Lx_1 - Wy_1 (j = 1)$$

$$(V + F)y_{j+1} + Lx_{j-1} - (V + F)y_j - Lx_j = 0 \quad (j = 2, 3, \dots, N_F)$$

여기서 N_F 는 공급단을 나타내며 $y_{N_F} = y_F = 0.198$ 이다.

식을 편리하게 나타내기 위하여 $R_1 = V/P$, $R_2 = L/W$ 라고

하면

$$R = \frac{L}{F} = \frac{R_2(R_1 + 1)}{R_1 + R_2 + 1}.$$

따라서 작업선의 방정식은 다음과 같다.

$$\text{빈화단: } y = \frac{L}{L + W}x + \frac{W}{L + W}y_W = \frac{R_2}{R_2 + 1}x + \frac{1}{R_2 + 1}y_W, \quad R_{2\min} = \frac{y_F - y_W}{x_F^* - y_F}$$

$$\text{농축단: } y = \frac{L}{V}x - \frac{P}{V}y_P = \left(1 + \frac{1}{R_1}\right)x - \frac{1}{R_1}y_P, \quad R_{1\min} = \frac{y_P - x_F^*}{x_F^* - y_F}$$

여기서 $x_F^* = \alpha_{y_F} / [1 - (\alpha - 1)y_F]$ 이다.

2. 수학적모형계산

계산과정

① 모형에서 변화시키려는 량들의 초기값들을 입력한다.

공급량 F , 공급기체의 초기조성 y_F , 얻으려는 제품의 조성 y_P , y_W , 환류비 R , 탑에서 액상류량 L 및 작업온도 T .

② 작업온도에서 분리계수 α 를 계산한다.

③ 매 단에서 기상조성을 계산하여 그것을 작업선방정식에 대입한다.

④ 매 단의 액상조성을 점근사법으로 계산한다.

우선 농축단의 액상조성을 계산한다. $x_i \leq 19.8$ 일 때 빈화단의 액상조성을 계산하여 설정된 마지막조성까지 계산한다.

⑤ 계산결과를 출력한다.

계산검증

분리계수(온도의 함수)와 y_P 에 따르는 최소환류비, 농축단에서의 최소리론단수를 계산하여 선행연구결과[3]와 대비한 결과는 표와 같다.

표. 수학적모형계산결과

분리결수	^{10}B 의 농축도	최소 환류비		최소 리론단수	
		계산값	선행연구결과[3]	계산값	선행연구결과[3]
1.05	0.600	52.7	54.0	37	38.3
	0.950	98.5	100.0	89	90.3
	0.999	104.9	106.2	169	171.3
1.04	0.600	65.3	67.5	46	47.7
	0.950	122.2	124.8	111	112.4
	0.999	130.2	132.8	210	213.4
1.03	0.600	86.4	90.0	61	63.2
	0.950	161.7	166.3	147	149.1
	0.999	172.2	177.1	278	283.1
1.02	0.600	128.6	135.0	92	94.4
	0.950	240.6	249.5	220	222.6
	0.999	256.3	265.6	415	422.7
1.01	0.600	255.2	270.0	182	187.8
	0.950	477.4	499.0	437	443.0
	0.999	508.5	531.0	827	841.4
1.005	0.600	508.3	540.0	362	373.9
	0.950	950.9	998.0	873	882.1
	0.999	1 012.9	1 062.4	1 653	1 675.1

표에서 보는바와 같이 모형계산결과는 선행연구결과[3]와 잘 일치하였다.

3. 동위체교환탑에서 온도와 환류비의 영향

온도에 따르는 리론단수변화 동위체교환탑에서 온도가 변하면 동위체분리결수가 달라지게 되며 따라서 탑의 분리효과와 분리효율에 영향을 미치게 된다.

$y_P=0.90$ 인 BF_3 기체를 $0.068\ 696\text{mol/h}$ 의 속도로 얻을 때 $y_F=0.198$, $R=V/P=R_{\min} \times 1.1$ 의 조건에서 온도에 따르는 리론단수변화는 그림 5와 같다.

그림 5에서 보는바와 같이 주어진 분리조건에서 농축단의 리론단수는 온도가 높아짐에 따라 커진다는것을 알수 있다. 일반적으로 온도가 낮을수록 단분리결수값은 커지며 분리효율은 높다. 따라서 같은 분리조건에서 온도가 낮은 공정일수록 농축단의 리론단수를 감소시켜 탑높이를 낮출수 있으며 설비와 운영비용을 줄일수 있다.

빈화단에서도 농축단에서와 같은 경향성이 나타났다.(그림 6)

이 결과는 식 $\ln \alpha = \ln k = 24.186\ 7/T - 0.050\ 4$ 에 의하여 설명할수 있다. 즉 단분리결수는 온도가 높아지면 작아지고 온도가 낮아지면 커지기때문이다.

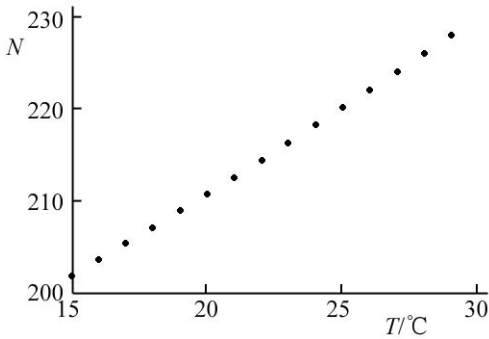


그림 5. 온도에 따르는 농축단의
리론단수변화

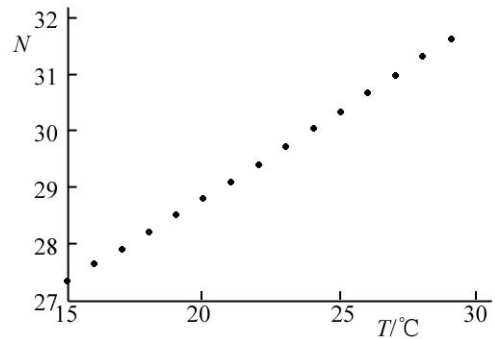


그림 6. 온도에 따르는 빈화단의 리론단수변화
 $y_F=0.198$, $y_W=0.14$, $R=L/W=R_{\min} \times 1.1$

환류비에 따르는 리론단수의 변화 환류비는 동위체분리탑의 운영조작에서 중요한 파라미터들중의 하나이며 환류비를 잘 결정하는것은 동위체분리탑을 연속적으로 안정하게 운영하기 위한 필요조건의 하나로 된다.

환류비에 따르는 농축단과 빈화단에서 리론단수변화는 그림 7, 8과 같다.

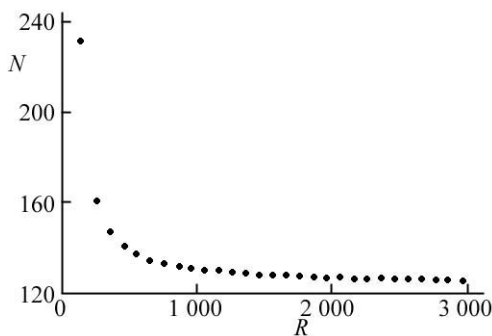


그림 7. 환류비에 따르는 농축단의
리론단수변화

$y_P=0.90$, $T=20^\circ\text{C}$, $P=0.068$ 696mol/h

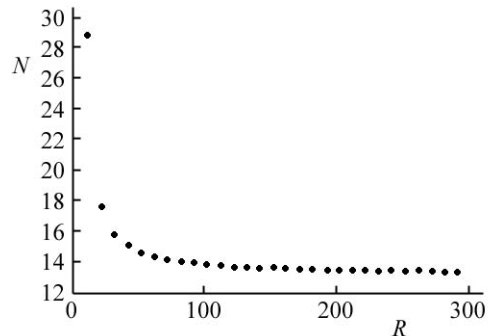


그림 8. 환류비에 따르는 빈화단의
리론단수변화

$T=20^\circ\text{C}$, $y_W=0.14$, $W=0.325$ 843mol/h

그림 7, 8에서 보는바와 같이 환류비가 커짐에 따라 농축단과 빈화단에서 리론단수는 감소하며 일정한 값(농축단 2 500, 빈화단 200)이상에서는 리론단수변화가 거의 없다. 즉 환류비가 커질수록 최소리론단수에 접근한다는것을 알수 있다.

일반적으로 주어진 분리조건에서 환류비를 증가시키면 농축단의 리론단수를 감소시킬수 있다.

농축단에서 환류비가 2 500보다 클 때 리론단수변화가 거의 없는것은 환류비가 커지면 탑에서 밖으로 나오는 량은 적고 환류되는 량이 많아지기때문이다. 즉 환류비를 계속 크게 하여도 환류비에 대한 환류비변화량과 계산에서 기-액류량변화가 매우 작아 리론단수에 미치는 영향이 그리 크지 않기때문이다.

빈화단에서도 농축단에서와 같이 설명할수 있다.

맺 는 말

화학교환법에 의한 붕소동위체분리탑에 대한 수학적모형화를 제기하여 최소리론단수와 최소환류비를 계산한 결과 선행연구결과[3]와 잘 일치되었다.

수학적모형화에 의하여 동위체교환탑에서 리론단수에 대한 온도와 환류비의 영향을 평가한 결과 $y_P=0.90$ 인 BF_3 기체를 0.068 696mol/h의 속도로 얻을 때 $y_F=0.198$, $R=V/P=R_{\min} \times 1.1$ 의 조건에서 온도에 따르는 농축단과 리론단에서의 리론단수는 온도가 높아짐에 따라 커진다는것을 알수 있다.

또한 환류비가 커짐에 따라 농축단과 빈화단에서 리론단수는 감소하며 일정한 값(농축단 2 500, 빈화단 200)이상에서는 리론단수변화가 거의 없고 환류비가 커질수록 최소리론단수에 접근한다는것을 알수 있다.

참 고 문 헌

- [1] 최광철 등; 동위체분리, 김일성종합대학출판사, 105~130, 주체95(2006).
- [2] S. G. Katalnikov; Separation Science and Technology, 36, 8-9, 1737, 2001.
- [3] A. A. Palko; Ind. Eng. Chem., 121, 4, 51, 1959.

주체104(2015)년 5월 5일 원고접수

Mathematical Model and Calculation in the Separating Process for Boron Isotope

Kim Sung Chol, Kim Chung Hyok

We built the mathematical model of isotope exchange column and theoretically studied the calculation of minimum number of theoretical stages in boron isotope separating column by chemical exchange method. And we considered the influences of temperature and reflux ratio on the number of theoretical stage in the isotope exchange column by mathematical model.

Key words: mathematical model, boron isotope, separating column