

붕소동위체분리탑에서 동위체수송비의 최량화

김승철, 오윤학

경애하는 최고령도자 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《제국주의자들의 핵공갈과 침략위협이 계속되는 한 우리는 세대가 바뀌고 정세가 어떻게 변하든 절대로 핵을 약화시킬수 없으며 주체적인 원자력공업을 끊임없이 발전시켜 나가야 합니다.》

원자로조종봉과 중성자방어재료, 암치료제로 널리 리용되고있는 ^{10}B 을 대량적으로 분리하는것은 매우 중요한 문제로 나선다.

지금까지 붕소동위체분리공정의 특성량들을 실험적으로 측정한 자료[1, 2]들은 많이 소개되었지만 이론적고찰은 수학적모형[4]만 제기되어있다. 화학교환법에 의하여 ^{10}B 을 공업적으로 생산하기 위하여서는 분리공정을 이론적으로 체계화하고 공업화생산에 필요한 기초자료들을 얻는것이 중요하다.

우리는 붕소동위체분리탑에서 공정파라미터의 하나인 동위체수송비에 대한 최량화를 진행하고 동위체수송비에 미치는 몇가지 분리인자의 영향을 평가하였다.

동위체수송비 θ 는 중요한 공정파라미터로서 $\theta=0$ 이면 완전환류조건이며 이때 동위체이동의 추동력은 최대로 된다. 즉 탑을 운영하는 초기에는 생산량이 0이지만 평형에 이르는 시간을 단축하는데 이 조건을 리용한다. 탑을 정상운영할 때 θ 값은 $0<\theta<1$ 에 놓인다. 탑을 설계할 때 θ 값은 여러 인자들과 함께 경제적비용을 타산하여 설정한다.

동위체의 종류와 분리공정의 특성에 따라 θ 값이 각이하므로 붕소동위체분리공정에서 합리적인 θ 값을 선택하는것은 매우 중요한 문제로 나선다.

붕소동위체분리탑에서 ^{10}B 수송량과 한계수송량은 다음과 같이 표시된다.

$$J = Py_p \quad (1)$$

$$J_0 = Lx_t - Vy_F, \quad x_t = x_F^e = \frac{\alpha y_F}{1 + (\alpha - 1)y_F} \quad (2)$$

여기서 P 는 제품생산량, y_p 는 목적하는 동위체농축도, y_F 는 공급물에서 목적하는 동위체농축도, x_t 는 공급단에서 주목하는 동위체성분의 농축도이다.

분리계수 $\alpha \approx 1$ 이므로 $J_0 \approx Ly_F(\alpha - 1/\lambda)$, $\lambda = L/V$ 이다.

현실에서 동위체분리탑은 한계동위체수송량 J_0 보다 작은 조건에서 운영된다. 이것을 동위체수송비 θ 로 표시한다.

$P \ll V$, $\lambda = L/V \approx 1$ 이므로

$$\theta = \frac{J}{J_0} = \frac{Py_p}{Ly_F(\alpha - 1)} \quad (3)$$

$\theta=1$ 일 때 분리탑의 리론단수는 무한대로 되며 이때의 흐름량을 최소흐름량 L_{\min} 이라고 한다.

$$L_{\min} = \frac{y_P}{y_F(\alpha - 1)} P \quad (4)$$

실제 흐름량은 $L = L_{\min} / \theta$ 이다.

탑에서 다음과 같은 가정이 만족된다고 하자.

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

봉소동위체분리탑의 농축단, 빈화단 및 전체 탑에서 물질바란스식은 다음과 같다.

$$L = P + V, \quad L + W = F + V, \quad F = P + W, \quad Fy_F = Wy_W + Py_P$$

여기서 L, V 는 동위체분리탑내부에서 액체와 기체 흐름량, W, F 는 각각 빈화단과 공급단에서의 흐름량이다.

동위체분리탑의 빈화단과 농축단에서 $R_1 = V / P$, $R_2 = L / W$ 라고 하면 작업선의 방정식들은 다음과 같다.

$$\text{빈화단: } y = \frac{L}{L+W}x + \frac{W}{L+W}y_W = \frac{R_2}{R_2+1}x + \frac{1}{R_2+1}y_W \quad (5)$$

$$\text{농축단: } y = \frac{L}{V}x - \frac{P}{V}y_P = \left(1 + \frac{1}{R_1}\right)x - \frac{1}{R_1}y_P \quad (6)$$

빈화단과 농축단에서 $R_{2, \min} = (y_F - y_W) / (x_F^* - y_F)$, $R_{1, \min} = (y_P - x_F^*) / (x_F^* - y_F)$ 로 표시된다. 여기서 $x_F^* = \alpha y_F / (1 - (\alpha - 1)y_F)$ 이다.

동위체분리탑에서의 환류비는 R_1, R_2 로부터 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$R = \frac{L}{F} = \frac{R_2(R_1 + 1)}{R_1 + R_2 + 1} \quad (7)$$

R_1 에 의하여 R_2 와 R 를 표시하면 다음과 같다.

$$R_2 = \frac{L}{W} = \frac{(R_1 + 1)(y_F - y_W)}{(y_P - y_F)} \quad (8)$$

$$R = \frac{L}{F} = \frac{(R_1 + 1)(y_F - y_W)}{(y_P - y_W)} \quad (9)$$

농축단의 임의의 단에서는 평형선의 방정식 $y_j = x_j / (1 - (\alpha - 1)x_j)$ 와 작업선의 방정식 $Lx_{j-1} - Vy_j = Py_P$ 로부터 농축도방정식을 유도할 수 있다.

$$\Delta x_j = x_j - x_{j-1} = \frac{\varepsilon x_j(1 - x_j)}{1 - \varepsilon x_j} - \frac{P}{L} \left[y_P - \frac{x_j}{\alpha(1 - \varepsilon x_j)} \right] \quad (10)$$

여기서 $\varepsilon = (\alpha - 1) / \alpha$ 이다.

$\varepsilon \ll 1$, $P \ll V$ 이므로 식 (10)은 다음과 같이 표시된다.

$$dx/dN = \varepsilon x(1 - x) - P(y_P - x)/L \quad (11)$$

¹⁰B의 농축도가 $x_i \sim y_p$ 까지 변할 때 요구되는 리론단수는 스모커방정식으로부터 구한다.

$$N = \frac{1}{\varepsilon(C_1 - C_2)} \ln \frac{(C_1 - x_t)(y_p - C_2)}{(C_1 - y_p)(x_t - C_2)} \quad (12)$$

식 (12)의 풀이에 식 (3)을 대입하면

$$C_1 = 1, C_2 = Py_p / (\varepsilon L) = \alpha \theta y_F. \quad (13)$$

식 (3)과 (6)으로부터 x_t 를 얻을수 있다.

$$x_t = \frac{L}{V} y_F + \frac{P}{L} y_p = \left[1 + \theta(\alpha - 1) \left(1 - \frac{y_F}{y_p} \right) \right] y_F \quad (14)$$

식 (12)에 식 (13)과 (14)를 넣으면

$$N = \frac{1}{\varepsilon(1 - \alpha \theta y_F)} \cdot \ln \frac{[1 - y_F - \theta(\alpha - 1)(1 - y_F / y_p)y_F](y_p - \alpha \theta y_F)}{(1 - y_p)[y_F + \theta(\alpha - 1)(1 - y_F / y_p)y_F - \alpha \theta y_F]}. \quad (15)$$

역류가 흐르는 충전탑에서 설비투자비는 탑의 체적에 비례하는데 탑의 체적은 류량과 NL 에 비례한다. 운영비는 탑안에서의 류량에 비례한다.[3]

$$C_{SP} = \left(\frac{C_{CV}}{\tau} + C_{OV} \right) \frac{V}{P_1} + \left(\frac{C_{CL}}{\tau} + C_{OL} \right) \frac{L}{P_1} = C_V \frac{V}{P_1} + C_L \frac{L}{P_1},$$

$$Z = C_{SP}, Z_1 = C_V, Z_2 = C_L, NL \sim V / P_1, L \sim L / P_1,$$

$$Z = Z_1 NL + Z_2 L \quad (16)$$

여기서 Z 는 동위체의 단위질량당 생산원가, C_{CV} 는 충전탑의 단위체적당 원가, C_{OV} 는 단위체적당 운영원가, C_{CL} 은 단위흐름당 투자비, C_{OL} 은 단위흐름당 운영비, τ 는 운영시간, P_1 는 100%의 동위체를 생산하는데 드는 생산원가, Z_1 과 Z_2 는 비례계수이다.

α , y_F , y_p , y_W , y_p 와 P 가 확정되었을 때 N 과 L 은 θ 값으로 결정한다.

θ 가 증가하면 L 은 감소하며 따라서 운영비가 감소된다. 그러나 N 은 매우 커지며 즉 설비투자비가 증가된다. 따라서 θ 를 최량화하면 총원가가 최대로 감소하게 된다.

$$(\partial Z / \partial \theta)_{\alpha, y_F, y_p, y_W, P} = 0 \quad (17)$$

$y_F = 0.198$, $y_p = 0.900$, $y_W = 0.14$ 일 때 Z_2/Z_1 에 따르는 θ_{opt} 의 변화는 그림 1과 같다.

그림 1에서 보는바와 같이 Z_2/Z_1 이 커짐에 따라 θ_{opt} 는 약간 증가한다. 이것은 총비용

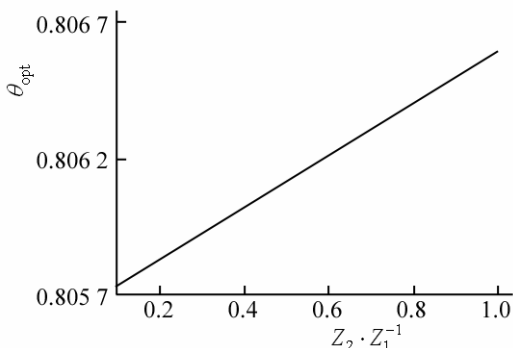


그림 1. Z_2/Z_1 에 따르는 θ_{opt} 의 변화

이 설비투자비로 결정되며 운영비의 영향은 상대적으로 작다는것을 보여준다.

θ 값에 따르는 공정파라미터들의 변화는 그림 2와 같다.

그림 2에서 보는바와 같이 주어진 농축조건에서 θ 값이 커짐에 따라 리론단수는 증가하다가 $\theta \approx 1$ 일 때 급격히 증가한다. 또한 θ 값이 커짐에 따라 빈화단에서의 환류비(R_1)는 감소하며 탑의 환류비 R 는 서서히 감소한다.

$\theta_{opt} = 0.806$ 일 때 리론단수에 따르는 ^{10}B 의

농도변화는 그림 3과 같다.

그림 3에서 보는바와 같이 $y_F = 0.198$, $y_p = 0.90$, $y_W = 0.14$, $\theta_{opt} = 0.806$ 일 때 요구되는 탑의 리론단수는 208이다.

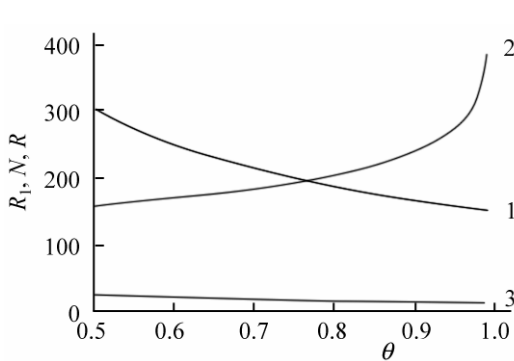


그림 2. θ 값에 따르는 $R_1(1)$, $N(2)$, $R(3)$ 의 변화

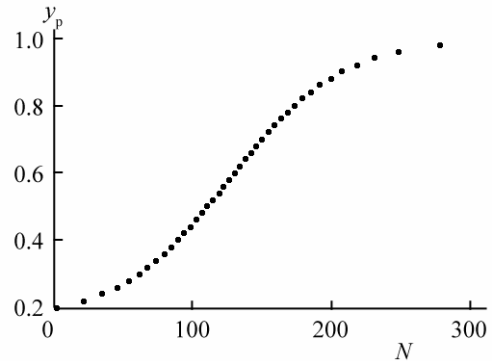


그림 3. 리론단수에 따르는 ^{10}B 농도변화

맺 는 말

화학교환법에 의한 붕소동위체분리탑에서 동위체수송비를 최량화하기 위한 방법론을 확립하였다. 동위체수송비에 대한 최량화로부터 주어진 농축도에서 θ 값이 커지면 환류비는 작아지며 리론단수는 $\theta \approx 1$ 일 때 급격히 증가하였다. $y_F = 0.198$, $y_P = 0.90$, $y_W = 0.14$, $\theta_{\text{opt}} = 0.806$ 의 조건에서 운영되는 분리탑의 리론단수는 208이다.

참 고 문 헌

- [1] S. G. Katalnikov; Separation Science and Technology, 36, 8–9, 1737, 2001.
- [2] A. Palko; Ind. Eng. Chem., 51, 121, 1959.
- [3] B. M. Andreev et al.; Separation of Isotopes of Biogenic Elements in Two-Phase Systems, Mendeleev University of Chemical Technology, 1~40, 2007.
- [4] K. Dash et al.; International Journal of Chromatographic Science, 6, 1, 1, 2016.

주체105(2016)년 12월 5일 원고접수

Optimization of the Relative Withdrawal in Boron Isotope Separating Column

Kim Sung Chol, O Yun Hak

We established the method to optimize the relative withdrawal in boron isotope separating column. From the optimization of the relative withdrawal, when θ value increases in given degree of enrichment, the reflux ratio decreases and number of theoretical plate rapidly increases in around $\theta \approx 1$. The number of theoretical plate of separating column is 208 in separating conditions of $y_F = 0.198$, $y_P = 0.90$, $y_W = 0.14$ and $\theta_{\text{opt}} = 0.806$.

Key words: relative withdrawal, boron isotope, separating column