

核融合燃料 三重水素 分離反應塔 電算模寫

정홍석, 이한수, 안도희
한국원자력연구소

황재영, 김상환
건국대학교

손순환, 정양근, 송명재
전력연구원

清水正巳
동위원소분리연구소

요 약

월성原子力發電所에서 생성되는 三重水素는 核融合爐의 必須原料物質이다. 삼중수소 분리반응탑에 소요되는 多段塔의 段數와 最適運轉溫度 및 반응탑의 효율을 결정하기 위하여, 흡수층과 촉매층으로 구성된 분리반응탑을 모델링하고, 전산코드를 작성하였다. 이 전산코드의 결과는 실험치와 잘 일치하였으며, 최소반응단수를 갖는 설계온도는 80°C임이 밝혀졌다.

1. 서론

월성原子力發電所에서는 호기당 매년 약 1Mci의 삼중수소가 生産된다. 重水의 中性子反應으로 생성된 삼중수소는 高分子觸媒 反應塔에서 분리되어 추후 핵융합연료로 유용하게 활용될 전망이다. 본 고에서는 삼중수소 분리반응탑에 소요되는 다단탑의 단수와 최적운전온도 및 반응탑 효율을 결정하기 위하여, 吸收層과 觸媒層으로 구성된 분리반응탑을 모델링하고 전산코드를 작성하여 삼중수소 분리반응탑의 最適化設計資料를 생산하고자 한다. 이 연구는 월성원자력발전소의 放射性廢棄物인 三重水素를 제거하여 環境保護 및 運轉員 被曝低減化에 기여할 뿐만 아니라 다음 세기를 위한 핵융합 발전 기술에 응용될 것이 기대된다.

2. 촉매교환반응탑의 수학적 모델

觸媒交換反應塔의 構造는 그림 1과 같이 소수성 촉매를 充填한 형태의 것이 대부분이며 액상과 증기상의 교환반응이 이루어지는 흡수층과 증기상과 기상의 교환반응이 이루어지는 소수성 촉매층으로 이루어져 있다. 한편 삼중수소 교환반응탑과 초저온 증류탑으로 이루어지는 삼중수소의 제거공정도는 그림 2와 같다.

삼중수소 교환반응탑의 운전조건은 계획중인 월성원전의 삼중수소 제거시설에 근거하여 표 1과 같이 설정하였다.

표 1. 三重水素 交換反應塔의 運轉條件

	입 구조건	출 구조건
三重水 濃度	10 Ci/kg D ₂ O (3.45 ppm)	0.3~5 Ci/kg D ₂ O
水素 濃度	0.019 ppm	2.175 ppm
三重水 流量	5760 gmol/hr	
水素 流量	9144.9 gmol/hr	
壓力	1 atm	

삼중수소 교환반응탑의 수학적 해석을 위하여 그림 3과 같은 반응탑의 모델을 설정하였다. i번째 단에서 흡수층에 대한 물질수지는 다음과 같다.

$$L_W(z_i - z_{i+1}) = l_W(y_i - y'_i) \quad (1)$$

i 단 흡수층의 效率 η_p 는

$$\eta_p = \frac{z_i - z_{i+1}}{z_{i,e} - z_{i+1}} = \frac{y'_i - y_i}{y'_{i,e} - y_i} \quad (2)$$

로 정의된다.

액-증기상의 同位體 分離係數를 α_v 라 하면, 低濃度 近似를 적용하여

$$\alpha_v = \frac{z_{i,e}}{y'_{i,e}} \quad (3)$$

로 표시할 수 있다.

(2)식과 (3)식에서 y'_i 을 다음으로 표시할 수 있다.

$$y'_i = (1 - \eta_p)y_i + \frac{1}{\alpha_v}z_i + \frac{\eta_p - 1}{\alpha_v}z_{i+1} \quad (4)$$

(4)식을 (1)식에 대입하면

$$z_{i+1} = \frac{\alpha_v + \gamma_l}{\alpha_v + (1 - \eta_p)\gamma_l} z_i - \frac{\alpha_v \gamma_l \eta_p}{\alpha_v + (1 - \eta_p)\gamma_l} y_i \quad (5)$$

로 표시되는데, 여기서 $\gamma_l = \frac{l_W}{L_W}$ 이다.

같은 방법으로 觸媒層에 관하여도 물질수지식, 효율 η_c , 그리고 저농도 근사에 의한 분리계수 α_g 를 다음의 식들로 표시할 수 있다.

$$l_H(x_i - x_{i-1}) = l_W(y'_{i-1} - y_i) \quad (6)$$

$$\eta_c = \frac{y_i - y'_{i-1}}{y_{i,e} - y'_{i-1}} = \frac{x_i - x_{i-1}}{x_{i,e} - x_{i-1}} \quad (7)$$

$$\alpha_g = \frac{y_{i,e}}{x_{i,e}} \quad (8)$$

기상과 증기상의 流量比 γ_g 는 $\gamma_g = \frac{l_H}{l_W} = \frac{p_{D_2}}{p_{D_2O}}$ 으로 정의된다.

따라서 x_i 와 y_i 는 다음 식들로 표시할 수 있다.

$$x_i = \frac{\gamma_g + (1 - \eta_c)\alpha_g}{\alpha_g + \gamma_g} x_{i-1} + \frac{\eta_c}{\alpha_g + \gamma_g} y'_{i-1} \quad (9)$$

$$y_i = \frac{\eta_c \alpha_g \gamma_g}{\alpha_g + \gamma_g} x_{i-1} + \left(1 - \frac{\gamma_g \eta_c}{\alpha_g + \gamma_g}\right) y'_{i-1} \quad (10)$$

y'_{i-1} 은 식 (1)에서

$$y'_{i-1} = y_{i-1} + \frac{1}{\gamma_l} (z_i - z_{i-1}) \quad (11)$$

로 계산할 수 있다.

식 (5), (9), (10), (11)을 이용하면 탑 하부에서 각 상의 농도가 주어질 때 첫번째 단에서부터 탑 상부까지 차례로 교환반응탑 내부의 각단의 농도를 계산할 수 있다. 이 방법을 逐次段法이라고 한다. 그런데 표 1에서 주어진 운전조건에서 탑상부의 액상농도가 주어졌으므로, 탑하부의 액상 농도를 적절히 가정하여 시행착오법으로 탑상부의 농도와 일치할 때까지 逐次段法으로 反復해야 한다.

3. 전산모사 결과 및 고찰

電算模寫에 필요한 입력자료로 표 1에 표시된 월성원전의 운전조건을 대입하였다. 탑상부의 삼중수 농도는 10 Ci/kg D₂O이고 수소의 유량은 9144.9 gmol/hr 이며 수소중의 삼중수소 농도는 천연수소 농도 0.019 ppm에서 2.175 ppm까지 농축된다. 흡수층과 촉매층은 효율이 1인 이상단이라고 假定하고 온도를 변화시켜면서 주어진 조건까지 농축하기 위하여 필요한 단수를 계산하여 보았다. 이 결과를 그림 4에 나타내었는데, 운전온도 80℃에서 단수가 최소가 됨을 알 수 있다.

그러나 실제로는 반응탑내 흡수층과 촉매층의 효율이 1인 이상단이 아니므로 각 단마다 효율을 고려하여 실측한 농도에 의해 吸收層과 觸媒層의 效率를 계산해야 한다. 清水正巳가 수행한 실험결과, 촉매층의 효율을 1로 하고 흡수층의 효율을 1이하로 변화시킨 경우보다 흡수층의 효율을 1로 하고 촉매층의 효율을 1이하로 변화시켜 구한 계산치와 잘 일치하였으며, 흡수층의 효율이 1일때 촉매층의 효율은 42℃에서 0.7~0.8 그리고 71℃에서 0.8~1로 측정되었다[1]. 이 결과는 촉매층만 분리하여 측정된 결과와 유사하게 나타났다. 따라서 교환반응탑의 효율저하는 주로 촉매층의 효율저하 때문에 일어난다고 할 수 있다. 흡수층의 효율 η_p 를 1이라고 하고 촉매층의 효율에 따른 단수의 변화를 그림 5에 나타내었는데, 효율이 증가함에 따라 단수가 감소함을 알 수 있다.

4. 결론

三重水素分離反應塔에 일어나는 三重水素化된 중수의 脫三重水素化 반응을 모델링하고 전산 모사한 결과, 분리반응탑의 단수가 최소가 되는 최적 온도는 80℃로 나타났으며, 반응탑의 성능은 농도 실측치와 일치하는 촉매층과 흡수층의 효율로 표시할 수 있었다. 이 탈삼중수소화 반응으로 제거된 삼중수소는 장치 核融合發電의 연료로 이용될 수 있으며, 삼중수소를 분리함으로써 환경보호와 방사능 피폭을 줄이는 效果가 기대된다.

참고문헌

1. 清水正巳 등, "중수소 및 삼중수소 분리", 學會出版센터(1982)

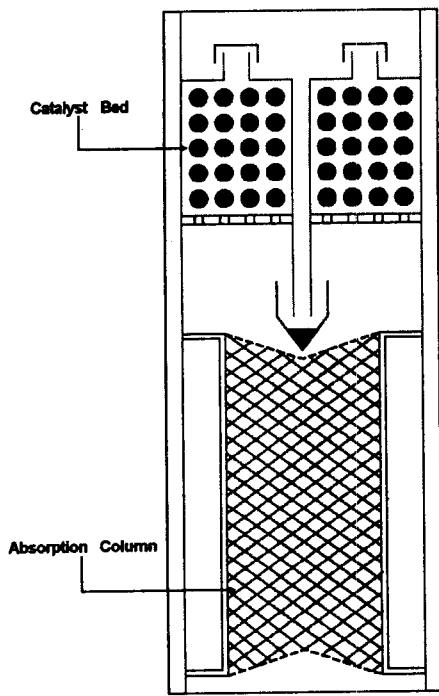


Fig. 1. Schematic Diagram of the Exchange Column.

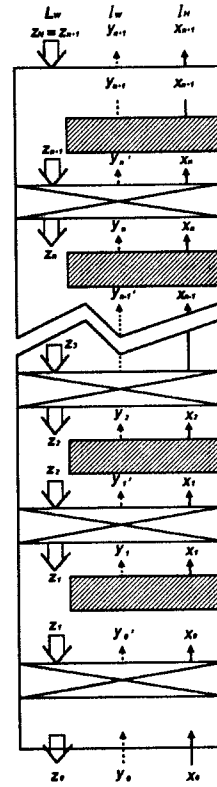


Fig. 3. Flow Diagram of the Multistage Exchange Column.

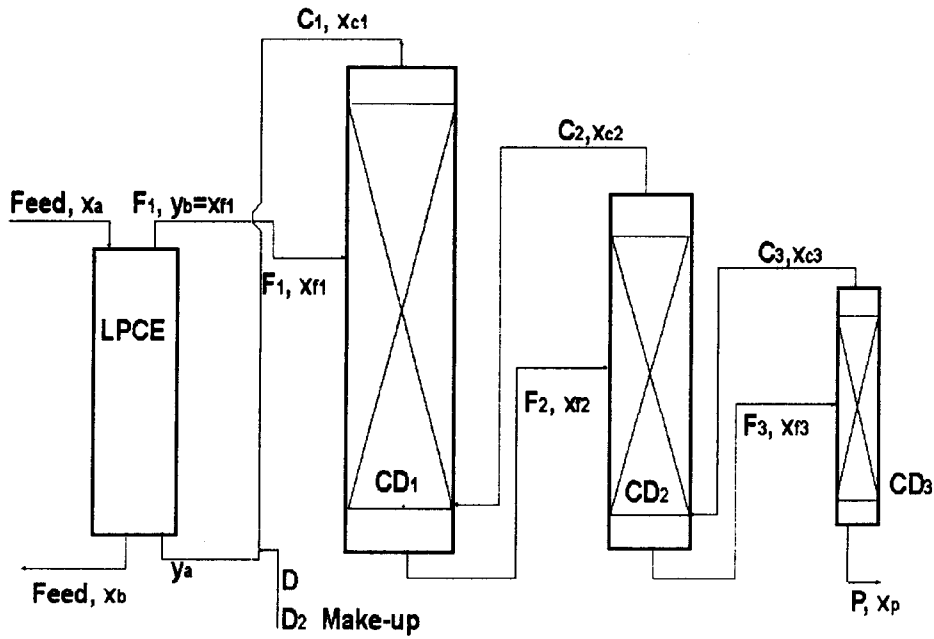


Fig. 2. Flow Diagram of the Process.

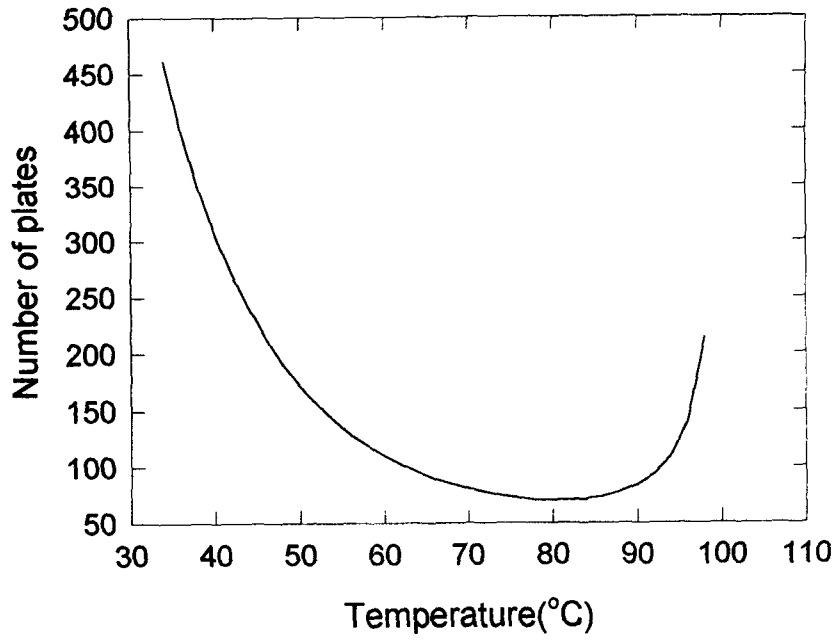


Fig. 4. The Influence of the Temperature on the Required Number of Plates.

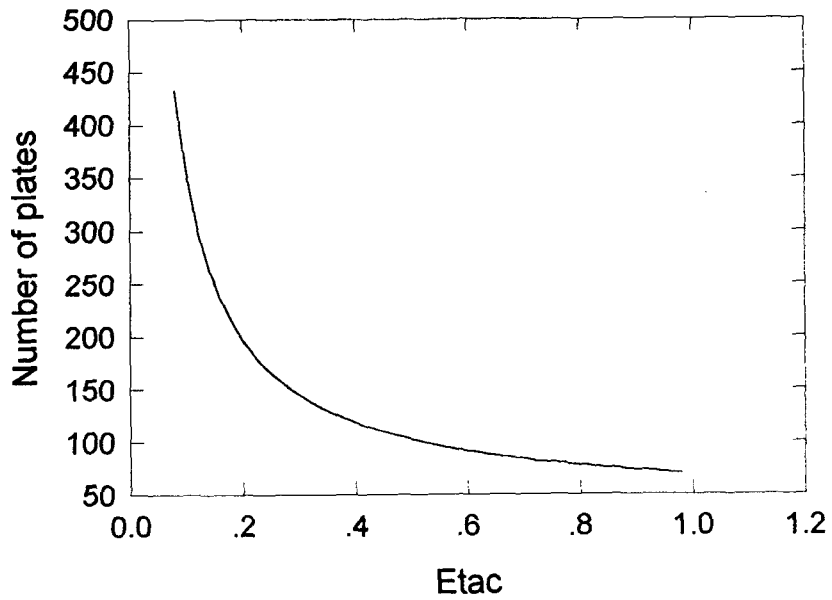


Fig. 5. The Influence of the Catalyst Bed Efficiency on the Required Number of Plates