면포의 염색가공(3)

- 면포의 염색(2) -

3.2 염색과정

염색과정은 일반적으로 다음의 3과정으로 되어 있다.

① 염욕(dye bath)에서 섬유표면으로 염료의 확산(diffusion)

② 섬유표면으로 염료의 흡착(adsorption)

③ 섬유표면에서 중심쪽으로 확산

즉 제1과정은 수용액 속에서 염료의 확산을 의미하는데, 제3과정인 섬유속으로의 확산에 비해 매우 빠르다. 예를 들면 증열시의 물, 팽윤된 풀 및 섬유상에서 염료의 확산계수는 각각 10^{-3}~10^{-4}, 10^{-5}~10^{-6} 및 10^{-7}~$10^{-8}cm^2/min$의 정렬도(order)로서, 섬유상으로의 확산속도가 이와 같은 염색계에서의 율속과정(rate-determining step)인 것이다. 또한 제2의 흡착과정은 제2의 흡착과정은 제1및 제3과정에 비해서 확산속도가 매우 빠르다.

그러나 이런 과정은 단일섬유나 단일피막으로 가정한 경우이고, 섬유집합체인 실이나 포 염색에서는 실이나 섬유간의 간극(clearance)을 통과하여 염료액이 이동하는 동안에 염료는 수상에서 섬유상으로 염착하고, 일부의 염료는 섬유상에서 수상으로 탈착(desorption)하는데, 이렇게 염착과 탈착을 반복하면서 피염물 전체가 시간경과와 함께 균일하게 염색된다. 이러한 염색과정은 염색계의 물질이동(mass transfer)으로서 취급할 수 있다.

3.2.1 패키지(package)의 염색과정

(1) 유동거동

실의 패키지를 균일한 공극분포를 가진 섬유집합체로 가정하고, 한편 액은 섬유와 접촉하면서 흐르기 때문에 액의 흐름을 유효직경을 가진 유속(flow rate)의 집합이라고 가정한다. 유속의 내부에는 정상류(steady flow)가 있다고 하고, 그 유선(stream line)상에 아주 작은 거리 *dr*을 고려에 넣고, 이 거리를 통과하는 동인에 *dp*의 압력강하가 생겼다고 하면 유속(*u*)과 액점도(η)와의 사이에 Darcy의 투과법칙(transmission rule)이 성립한다.

$$u = \frac{K}{\eta} \cdot \frac{dp}{dr} \quad \cdots\cdots (3\text{-}1)$$

여기서 K는 패키지의 구조와 관련이 있는 정수로서 비투과율이다.

(3-1)식에서 $dp/dr = \Delta p/r$라고 하면, 단면적 A를 통과하는 유량 q는 (3-2)식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} q &= A \cdot u \\ &= K \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \frac{A}{r} \cdot \Delta p \quad \cdots\cdots (3\text{-}2) \end{aligned}$$

(3-2)식에서 $A/r \equiv 2\pi l / ln(r_0/r_i)$라고 하고, 중력(gravity)환산계수g를 대입하면 (3-3)식을 구할 수 있다.

$$q = K \cdot \triangle p \frac{1}{\eta} \cdot \frac{2\pi l}{ln(r_0/r_i)}$$

$$q = \frac{2\pi l K}{\eta} \cdot \frac{g(p_i/p_0)}{ln(r_0/r_i)} \quad \cdots\cdots (3\text{-}3)$$

여기서 *r*은 패키지의 반경, *l*은 원통의 길이, r_i 및 r_o는 패키지의 내경 및 외경, p_i 및 p_o는 패키지 내외의 압력이다.

(3-2)식에서 K, $1/\eta$, A/r가 일정하고, 패키지내의 흐름이 층류(laminar flow)라면 q와 Δp는 서로 비례한다. 또한 q/Δp는 흐름의 투과성이라고 부르는데, q/Δp와 $1/\eta$또는 $2\pi l/ln(r_0/r_i)$과는 다른 조건을 일정하게 하면 서로 비례한다.

또한 패키지의 공극을 ε과 비투과율 K와의 관계는 Kozeny-Carman식인(3-4)로 나타낼 수 있다.

$$K = \frac{\varepsilon^3}{K_0 S_0{}^2 (1-\varepsilon)^2} \quad \cdots\cdots (3\text{-}4)$$

여기서 K_0는 Kozeny정수, S_0는 비표면적이다. 이들 여러 식으로부터 패키지내에서의 흐름에 대해서는 공극률이 가장 크게 영향을 미치고, 또한 유속과 유량은 중심축에서의 거리 또는 액의 점도 증가에 따라 쌍곡선처럼 저하한다.

그런데 실의 패키지에서 액의 흐름을 검토하는 경우, 실 또는 섬유간의 공극과 같은 공간 구조에 착안하여 패키지 전체의 흐름에 대해 각 공극에서의 흐름을 해석할 필요가 있다.

지금 패키지를 구성하는 실을 직경 d_y의 평평한 원통으로 간주하고, 사내에는 직경 d_f의 평평한 비투과성의 필라멘트가 n을 모여있다고 가정하여, 사내(섬유간)의 공극률을 ε_f라고 하면 실의 비투과율 K_f는 (3-5)식으로 나타낼 수 있다.

$$K_f = \frac{d_f{}^2}{16k_0} \cdot \frac{\varepsilon_f{}^3}{(1-\varepsilon_f)^2} \quad \cdots\cdots (3\text{-}5)$$

마찬가지로 실을 직경 d_y의 비투과성 원통체라고 가정하고, 시간의 공극률을 εy로 하면 실 집합체의 비투과율 K_y는 (3-6)식으로 나타낼 수 있다.

$$K_y = \frac{d_y{}^2}{16k_0} \cdot \frac{\varepsilon_y{}^3}{(1-\varepsilon_y)^2} \quad \cdots\cdots (3\text{-}6)$$

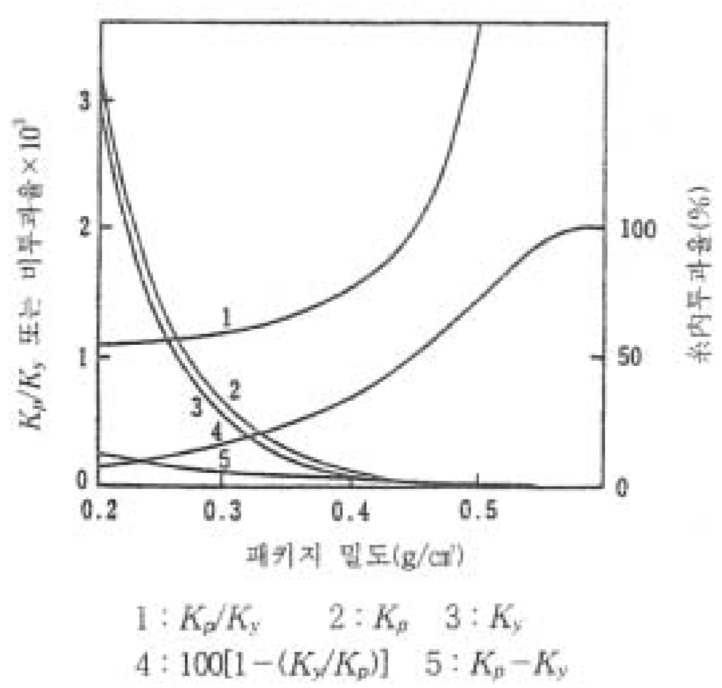
그런데 권사 패키지와 같이 2종류의 공극률을 가진 집합체의 비투과율을 산출하기는 어렵지만, McGregor는 전체 비투과율 K_p와 그 밖의 비투과율과의 관계를 (3-7)식으로 나타내었다.

$$\frac{K_p}{K_y} = 1 + 1.80\frac{K_f}{K_y} + 2.68\left(\frac{K_f}{K_y}\right)^{1/2} \quad \cdots\cdots (3\text{-}7)$$

또한 (3-7)식을 각종 공극률로 나타내면 (3-8)식이 얻어진다.

$$\frac{K_p}{K_y} = 1+1.80\,\alpha^2\beta^2\gamma^2 + 2.68(\alpha^2\beta^2\gamma^2)^{1/2} \quad \cdots\cdots (3\text{-}8)$$

<그림 3.6>및 <표 3.3>은 패키지의 밀도와 각종 비투과율과의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 $100[1-(K_y/K_p)]$는 우측에 표시하였으며, 사내 투과유량을 나타낸다.



<그림 3.6> 패키지 밀도와 각종 비투과율의 관계

<표 3.3>

패키지밀도 (ρ $_p$) [g/cm^3]	간접법에 의한 패키지 통과유량계산 α″= α′= 5.11×10^{-2}			직접법에 의한 패키지 통과유량계산 α″= α′= 5.58×10^{-2}		
	K_p/K_y	100[1-(K_y/K_p)]*	K_p**	K_p/K_y	100[1-(K_y/K_p)]	K_p
0.20	1.08	7.40	3.25×10^{-3}	1.04	3.90	3.13×10^{-3}
0.22	1.10	9.10	2.34	1.05	4.80	2.33
0.23	1.11	9.90	2.00	1.06	5.70	2.00
0.24	1.12	10.7	1.70	1.06	5.70	1.76
0.26	1.14	12.3	1.23	1.07	6.50	1.31
0.28	1.17	14.5	9.01×10^{-4}	1.08	7.40	9.87×10^{-4}
0.30	1.20	16.7	6.63	1.09	8.30	7.51
0.32	1.24	19.4	4.88	1.11	9.90	5.81
0.34	1.29	22.5	3.55	1.12	10.7	4.39
0.36	1.39	28.1	2.58	1.14	12.3	3.37
0.38	1.43	30.1	2.87	1.16	13.8	2.56
0.40	1.53	34.6	1.33	1.19	16.0	1.96
0.42	1.68	40.5	9.60×10^{-5}	1.23	18.7	1.50
0.44	1.89	47.1	6.74	1.27	21.3	1.14
0.46	2.20	54.6	4.66	1.31	23.7	8.50×10^{-5}
0.48	2.70	63.0	3.18	1.38	27.5	6.32
0.50	3.63	72.5	2.16	1.46	31.5	4.67
0.52	5.62	82.2	1.45	1.57	36.3	3.39
0.54	11.40	91.2	1.00	1.72	41.9	2.44
0.56	39.41	97.5	6.93×10^{-4}	1.94	48.5	1.75
0.58	864.0	99.9	5.25	2.28	56.1	1.21

㈜ : 1)* : 100[1-(K_y/K_p)]는 패키지 전체 유량에 대한 사내 통과유량의 백분율(%)를 나타냄

2)** : 총괄 비투과도 K_p는 ρ $_p$= 0.23g/cm^{3}에서 실험치와 일치하도록 계산함

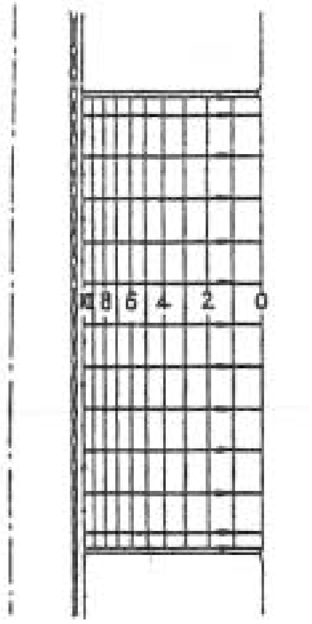
이들 결과에서 알 수 있는 것처럼 패키지의 밀도가 낮은 경우, 실은 거의 비투과성 원통체로 거동하여 유체유동의 5~10% 밖에 사내(섬유간)를 투과하지 못하는데, 전체 저항이 작기 때문에 비투과율 K_p 및 K_y가 크고, 더 나아가 패키지로의 전체 유량 및 사간 유량도 크다. 한편 사간 공간율 ε_y의 저하에 의해 패키지밀도가 증가하면 K_p/K_y 및 사내 투과량은 상당히 증가하지만, 전체 저항이 커져 비투과율 K_p 및 K_y가 현저히 저하하고, 더 나아가 패키지로의 전체 유량 및 사간 유량도 매우 적게 되어 전체로서 유량부족을 일으킨다.

패키지염색에서 사내의 흐름은 염착의 국부적인 속도를 결정하고, 사간의 흐름은 이에 더하여 패키지 전체로 염료의 균일한 분배와 그 이행성에 영향을 미치기 때문에 균염성이라는 효과면에서 둘은 서로 다르다.

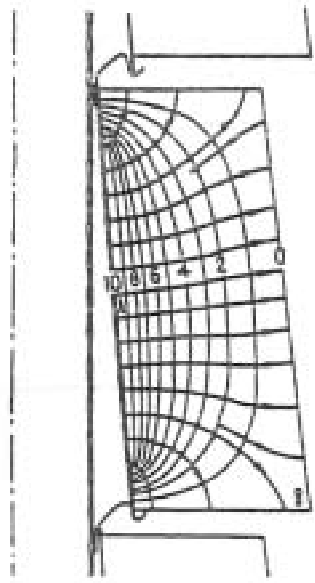
또한 패키지염색에서는 유선의 형태와 흐름분포가 가공의 균일성을 근본적으로 규정한다. Denton은 패키지 내의 액류(liquor flow)를 전해조(electrolyte trough)안의 전류에 비교하고, 그 유사이론 (analogy theory)으로부터 이 전기적 모델의 전위(electric potential)분포를 패키지와 유사한 경계조건 하에서 측정하여 패키지 내의 압력분포를 추정하였다. 그 결과가 Laplace방정식의 해석과 일치하는 것으로 되어 있다. 그 결과의 예가 <그림 3.7> ~ <그림 3.9>와 같으며 각각의 조건에 대하여 등압선과 유선을 나타낸다.

이들 유선도에서 알 수 있듯이 유선을 해석함으로써 등압선과 일치하는 형태의 패키지를 만들 수 있으며, 흐름을 바꾸면 어깨(shoulder)부분의 불염화(immunizing)를 방지할 수 있다. 예를 들면 <그림 3.8>에서는 어깨부분이 불염화 되어 있는데, <그림 3.9>의 (a)처럼 패키지의 형태를 유선의 등압선형으로 바꾸면 불염화 부분이 없어진다. 또 그림의 (c)와 (d)는 액의 흐름방법을 변경시킨 예로서, (c)에서는 흐름의 불균일성이 발생되었으나 (d)는 균일성이

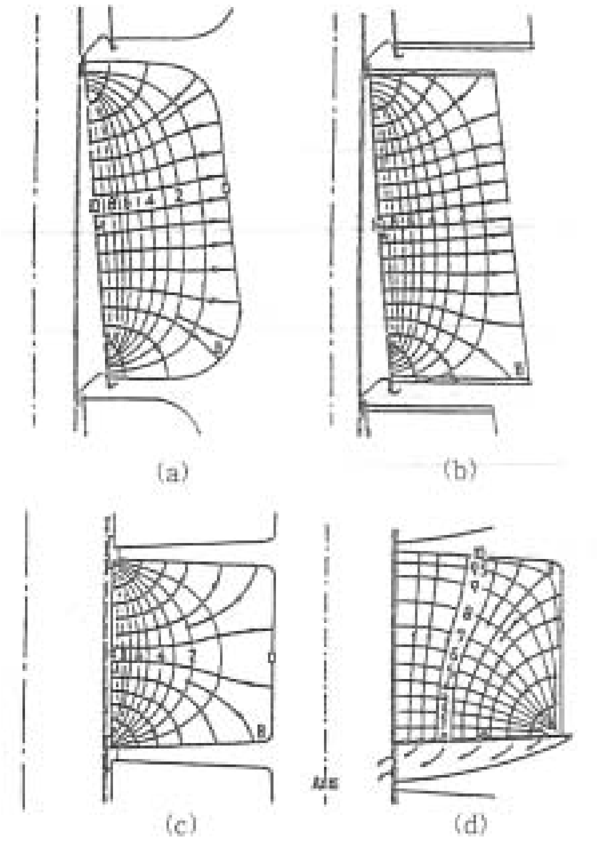
우수함을 알 수 있다.



<그림 3.7> 패키지 내에서의 유선 및 압력분포



<그림 3.8> 패키지 내에서의 유선 및 압력분포



<그림 3.9> 각종 패키지 내에서의 흐름

패키지 내의 압력분포가 Laplace방정식의 해석과 일치한다는 점에서 이 방정식을 패키지 경계조건의 기본으로 하여 풀면 압력분포, 유속분포, 유량 등의 계산식을 얻을 수 있다.

지금 패키지가 Darcy법칙에 따른다면

$$u = (K/\eta)\nabla p \qquad (3\text{-}9)$$

또한 액의 물성이 항상 일정하다면,

$$\nabla \cdot u = 0$$

따라서

$$\nabla^2 p = 0$$

그런데 Laplace방정식을 원통 좌표로 나타내면,

$$\nabla^2 p = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\frac{\partial p}{\partial r}(r\frac{\partial p}{\partial r}) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 p}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = 0 \quad \cdots\cdots (3\text{-}10)$$

여기서 <그림 3.7>의 패키지의 경우를 감안하면, 축대칭(axial symmetry)이므로 $\partial p/\partial z$ =0, 또한 패키지의 끝은 밀봉(seal)되어 축방향의 압력기울기(shope)가 없으므로 $\partial p/\partial z$ =0이 된다. 그러므로 식(3-10)은,

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\frac{\partial p}{\partial r}) = 0 \quad \cdots\cdots (3\text{-}11)$$

여기서 $p(r_i) = p_i$, $p(r_0) = p_0$로 하여, 이것을 풀면,

$$P_{i0} = \frac{p_i - p_0}{\ln(r_0/r_i)}\ln\frac{r_0}{r} + p_0 \quad \cdots\cdots (3\text{-}12)$$

$$P_{0i} = \frac{p_0 - p_i}{\ln(r_0/r_i)}\ln\frac{r}{r_i} + p_i \quad \cdots\cdots (3\text{-}13)$$

유속은 위 식으로부터 dp/dr을 구하고, (3-9)식에 대입하여 구한다.

$$u_{i0} = \frac{k}{\eta} \cdot \frac{g(p_i - p_0)}{\ln(r_0/r_i)} \quad \cdots\cdots (3\text{-}14)$$

$$u_{0i} = \frac{k}{\eta} \cdot \frac{g(p_0 - p_i)}{r\ln(r_0/r_i)} \quad \cdots\cdots (3\text{-}15)$$

또한 유량은 $q_{i0} = 2\pi rl \cdot u_{i0}$, $q_{0i} = 2\pi rl \cdot u_{0i}$,이다.

이들의 식에서 i0는 안에서 밖으로, 0i는 안으로 흐르는 것을 나타낸다.

(2) 염착거동

패키지속의 가는 관을 통하여 염액이 흐르는 동안에 액과 실과의 사이에어 염료의 교환, 즉 염착이 일어나고, 염색은 다시 염욕속으로 되돌아간다고 가정하고, 염액의 유속 v, 임의의 시간 t, 임의의 위치 x에서의 염료농도 c, t 시간 후의 염착량 M, 평형염착량 M_E, 교환계수를 K라고 한다면,

$$\frac{\partial M}{\partial t} = K(M_E - M) \quad \cdots\cdots (3\text{-}16)$$

$v(c_1\text{-}c_2)$ = 단위시간에서의 염착량 증가

= M/sec의 증가×단위당 사 중량 ⋯⋯ (3-17)

= M/sec의 증가×$W(x_2\text{-}x_1)$

$$\frac{c_1 - c_2}{x_1 - x_2} = \frac{\partial M}{\partial t} \cdot \frac{W}{v} \quad \cdots\cdots (3\text{-}18)$$

$$\frac{\partial c}{\partial x} = \frac{WK}{v}(M_E - M) \quad \cdots\cdots (3\text{-}19)$$

여기서 W는 단위길이 당 실의 중량이다. 또한 M_E는 다음과 같이 가정한다.

$$M_E = RC^{1/2} \quad \cdots\cdots (3\text{-}20)$$

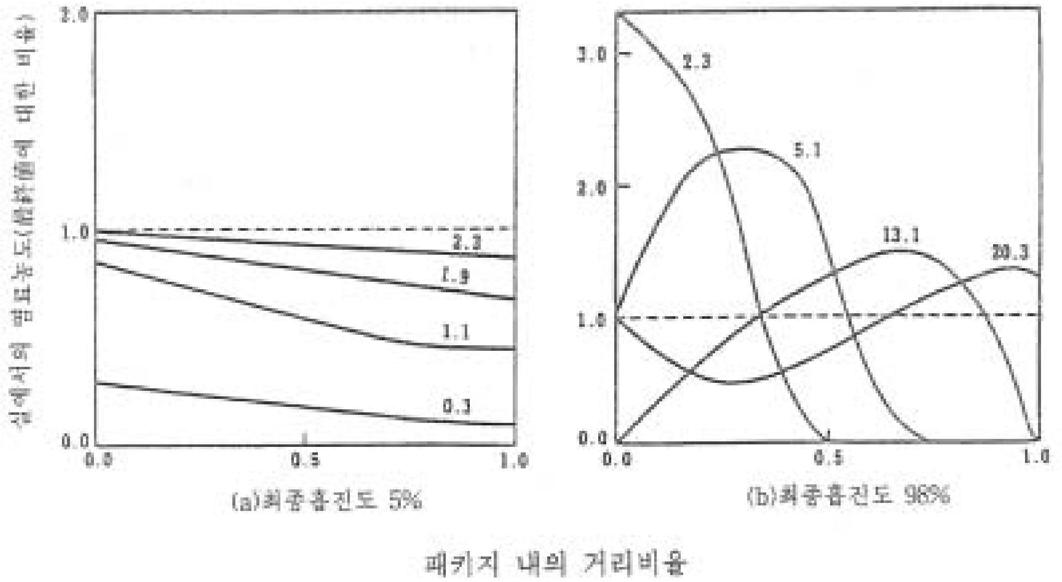
식(3-16)은 패키지의 임의의 점에서의 염색속도이고, 식(3-19)는 패키지에서의 농도기울기이다. 여기서 다음의 경계조건을 부여하고,

$M = 0,\ 0 < x < l,\ t = 0$

$V_{cx=0} = V_{c0} - \int_0^l WMd_x$

식(3-16)과 (3-19)를 풀면, 패키지염색에서 염색거동에 미치는 제반 요소의 영향을 알아 낼 수 있다. 여기서 V는 염액량, C_0는 초기농도, $C_x = 0$는 패키지 입구부의 농도이다.

<그림 3.10>은 패키지 내부에서 염료분포의 시간변화를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 최종흡진율이 낮으면 염색의 초기단계라도 패키지 전체에 걸쳐 매우 균일하게 염료가 분포하게 되고, 그 후 시간이 경과함에 따라 서서히 평형값에 가까워진다. 그러나 최종흡진율이 높으면 염색초기단계에서는 모든 염료가 패키지 바깥쪽부분에 염착하여 내부가 염색되지 않은채 염욕이 소모되어 버린다. 이어서 시간이 경과하면서 바깥쪽의 염료가 탈착(desorption)하여 이염(migration)이 일어나고, 시간이 지나면 서서히 내부로도 염료가 분포하게 되는데, 균일하게 분포하는 데는 최종흡진율이 낮은 경우에 비해 매우 긴 시간을 필요로 한다.



<그림 3.10> 최종흡진도가 각 시간후의 패키지 내의 염료분포에 미치는 영향

(점선은 평형상태, 곡선 위의 숫자는 시간을 나타냄)

패키지염색에서 유속 및 액량과 균염성과 관계는 <그림 3.11>, <그림 3.12>와 같으며, 이들 결과로부터 다음 사항을 알 수 있다.

① *v*/KV가 일정하면, 평형흡진율이 낮을수록 단시간에 균염이 된다.

② 평형흡진율이 일정하면, v/KV가 클수록 단시간에 균염이 된다.

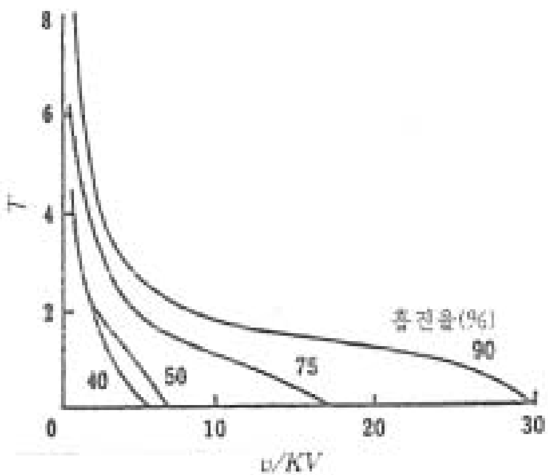
③ *v*/KV가 크면, 염색초기에 이미 균염성은 양호하다.

④ K가 큰 염료, 예를 들어 속염성 염료는 염색초기에는 불균염이 되지만 이염성이 크기 때문에 빠르게 균염이 된다. 한편 K가 작은 염료는 염색초기부터 이미 균염성이 양호하다.

⑤ *v*/KV를 크게 하기 위해서는 유속 *v*를 크게 하던지, V 또는 K를 작게 한다.

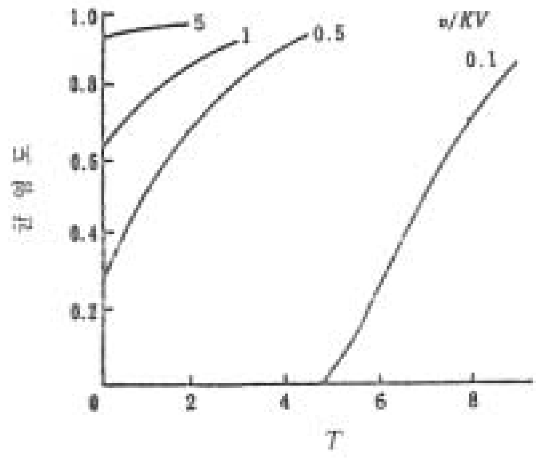
①과 ④항목은 <그림 3.10>과 같지만, 그 밖의 항목은 공업적으로도 중요하다. 특히 패키지염색이 래피드화(rapid)기술에서는 높은 유속과 낮은 욕비가 중요시되는데, 그 배경은 위의 이론으로 이해할 수 있다.

한편 빔(beam)염색에 대해서도 패키지염색과 똑 같은 이론을 전개하게 되어 있다.



<그림 3.11> 균염성에 미치는 유속(v/KV)의 영향

(T : 95%의 균염성이 필요한 시간)



<그림 3.12> 균염성과 시간(T)과의 관계(욕비 20배, 평형흡진율 50%)

(T : 95%의 균염성이 필요한 시간)

(3) 염색과정의 최적화

염색과정의 최적화는 가공시간의 단축과 품질의 향상 등을 목적으로 하여, 특히 최근에 주목되고 있는데, 오늘날은 컴퓨터의 진보에 따라 최적조건의 선정 및 제어를 용이하고도 경제적으로 행할 수 있게 되었다.

최적화(optimization)의 기본적인 과제는 경제적이면서, 동시에 균염(level dyeing)으로 안정된 품질을 최단시간에 염색하는 거시다. 이를 위해서는,

① 염색시 낭비시간의 제거

② 섬유집합체로의 염료의 침투성 및 균일한 분포의 촉진.

③ 염색속도와 확산속도의 조정으로 초기염착성의 억제

등의 제반조건이 충족되어야 한다.

제①의 조건은 염색조작의 경제성과 생산성을 높이는 데 꼭 필요하다. 배치(batch)법에서는 불균염이 일어나지 않는 범위에서 염색속도가 최대로 되도록 조건을 선택하고 있다.

제②의 조건은 배치법에서 균염을 얻기 위한 기본적인 조건이다. 즉 패딩

을 기본으로 하는 연속염색(continuous dyeing)에서는 염료와 섬유집합체의 접촉이 패딩조작에 의해 균일하게, 신속하게, 그리고 저욕비로 행해지는데, 배치법에서는 모든 방법이 염료와 섬유집합체와의 접촉이 불균일하고, 고욕비로 행해진다. 이 때문에 배치법에서는 접촉이 나쁜 문제를 조건의 완화와 처리시간의 조절로 커버하는 수법을 취하고 있는데, 어떤 수단을 써서라도 접촉을 향상시키고, 침투성과 염료의 균일한 분포성이 촉진되면 염색시간을 단축할 수가 있다.

제③의 조건은 균염을 얻기 위한 기본조건이지만, 특히 패키지염색에서는 염색속도와 확산속도의 조절을 잘못하면 패키지 내외의 농도 차이와 각 실에서 링 염색화(ring dyeing)의 원인이 된다. 예로서 그 동안의 사정을 모형으로 나타내면 <그림 3.13>과 같은데, 염색속도가 확산속도보다 빠르면 빠를수록 그림과 같이 골이 깊어져, 이른바 초기염착성이 커진다. 그러나 두 속도의 조정을 잘하면 골도 낮아지고, 염색의 전과정에 걸쳐서 균염성을 유지할 수 있다. 그리고 두 속도의 조정을 기본으로 불균염이 발생하지 않는 한계까지 염색속도를 높일 수 있다.

위의 여러조건을 충족하기 위한 구체적인 조건은 일반적으로,

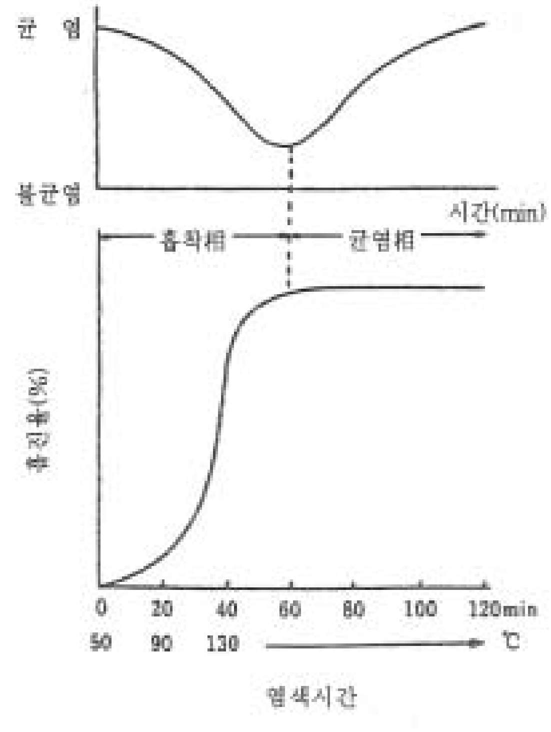
① 염료의 흡수역과 최적 염색 개시온도를 선정함으로써 그 이하의 온도에서는 염색조작은 생략하여 낭비시간을 제거한다.

② 균염성이 방해되지 않는 범위에서 염색속도를 최고로 높인다. 이를 위해 승온속도, 유속, 조제 첨가를 조절한다.

③ 염색 후 섬유의 물성에 나쁜 영향을 주지 않는 범위에어 강온속도를 빠르게 하고, 배액(drainage)온도를 높게 한다.

위와 같은 수단을 발휘함으로써 염색조작시간을 크게 단축할 수 있으며, 품질의 안정을 도모할 수 있다.

염료의 흡수역과 최적 염색개시온도는 기본적으로 섬유의 수중에서의 유리전이온도(glass transition temperature)를 기준으로 한다. 즉 이 이하 온도에서의 염색속도는 매우 느리고 염색효과도 빈약하기 때문에 낭비시간으로 간주하여 제거한다. 최적염색개시온도는 섬유의 특성, 섬유집합체의 상태, 염료의 농도, 조제 등에 따라 조절한다.



<그림 3.13> 염색과정에서의 균염성

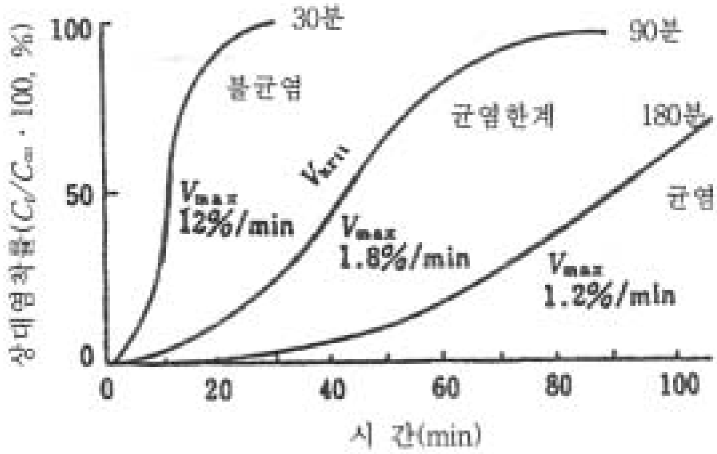
(3-12)로 나타내고, 불균염이 일어나지 않기 위한 최대한의 속도를 임계염색속도(V_{knit})라고 하였다.

$$V_{sig} = \frac{1}{C_\infty}\int \frac{dc^2}{dt}$$

$$= \frac{1}{C_\infty}\int V_t \cdot dc \quad \cdots\cdots (3\text{-}21)$$

여기서 C_∞는 평형염착량, *dc*는 시간 *dt*에서의 염착량, V_t는 *dc/dt*이다.

임계염색속도와 균염성과의 관계를 모형으로 나타내면 <그림 3.14>와 같고, 염색속도가 V_{knit}보다 빠르면 불균염, 느리면 균염이 얻어진다.



<그림 3.14> 임계염색속도(critical dyeing rate)와 균염성의 관계

임계염색속도는 섬유의 종류 외에도 유속과 패키지밀도와도 관계가 있으며, 염액의 순환속도가 빠르거나 피염물과 염액과의 접촉이 높을수록, 또한 밀도가 저하할수록 Vknit는 증가한다.

그런데 배치법에서는 통상 점차승온법으로 염색하기 때문에 염색속도를 승온속도로 제어한다. 일반적으로 배치법에서 균염을 얻기 위해서는 염색속도 2%/min 정도가 적당하다고 되어있기 때문에 이 속도에 맞출 수 있도록 승온속도를 선택하고 있다.

염색속도와 승온속도와의 관계는 보통 경험에 의존하고 있다. 그러나 (3-22), (3-23)의 관계식도 발표되어 있다. Popescu는,

$$r = \frac{1}{b} Af(1-\alpha)\exp(-E/RT) \quad \cdots\cdots (3\text{-}22)$$

$f(1-\alpha) = (1-\alpha)^n$ ··· (3-23)

로서, 승온시의 염색속도가 일정하다면,

$dr/dT = 0$ ·· (3-24)

$$b = \frac{An(1-\alpha)^{n-1}\exp(-E/RT)}{E/RT^2}$$ ·· (3-25)

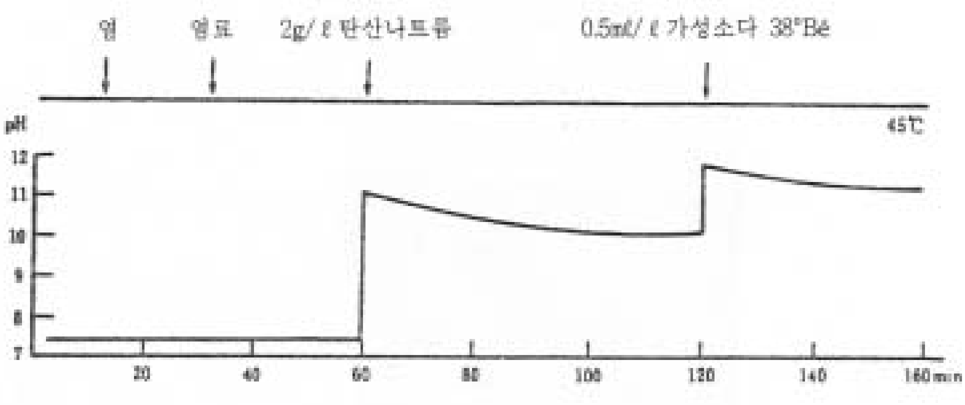
여기서 $r = d\alpha/dt$, $\alpha = c_t/c_0$, $b = dT/dt$, E는 활성에너지, T는 온도, t는 시간, c는 염착량, n은 반응차수(order of reaction)이다.

또한 승온속도를 일정하게 한 경우의 염색속도는 식으로 (3-26)식이 제시되었다.

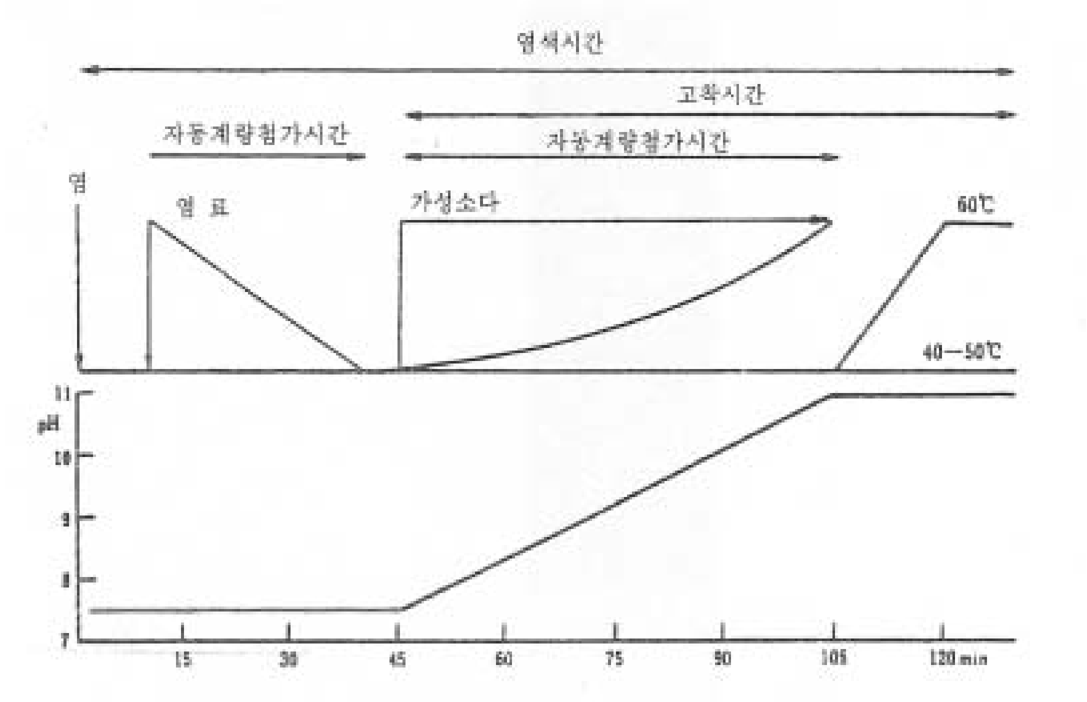
$Mt/M_\infty = A\beta^{-1/2}\{\exp\beta(t-t_0)+\beta t_0-1\}^{1/2}$ ··· (3-26)

여기서 $\beta = \alpha E/RTT_0$, $\alpha = dt/dT$, E는 활성화에너지, M은 염착량이다.

반응성염료(reactive dye)에 의한 셀룰로스섬유의 패키지염색에서는 염료 자체의 균염성이 높아 흡수(absorption)과정에서는 균염상의 문제가 적지만, 다음의 고착(fixing)과정에서 문제가 발생한다. 즉 고착시 욕의 pH 경시변화를 예로 들면 <그림3.15>, <그림 3.16>과 같다.



<그림 3.15> 표준염법에서 탄산나트륨 및 가성소다 사용에 따른 pH곡선



<그림 3.16> Lever metering법에 의한 pH곡선

<그림 3.15>는 알칼리첨가방법이 적정하지 않기 때문에 pH는 끝이 뾰족한 톱날 모양으로 변화하며, 그 결과 고착과정이 원활하게 진행되지 않아 불균염이 된다. 한편 <그림 3.16>은 pH가 시간에 따라 직선적으로 증가하기 때문에 <그림 3.15>에 비해 고착은 원활하게 진행되어 흡수과정의 균염성을 유지하면서 고착이 진행된다. 다만 <그림 3.16>에서 직선의 기울기는 염료와 피염물의 상태로 조절하여 적정화한다.

마찬가지로 각 염색계에서 촉염제(accelerating agent) 첨가방법에도 적용할 수 있는데, 특히 배치(batch)방법에서 촉염제의 최적 첨가기술은 중요하다.

염색종료 후의 강온속도와 배액온도는 조작시간을 단축한다는 점에서는 중요하지만, 피염물에 따라서는 주름고정이나 태에 영향이 있으며, 또한 문제도 많다.