

Autoclave를 이용한 전선피복용 고무의 무테이핑 가황공정시 후처리 운전기술

김 덕 준 · 최 상 순* · 김 태 호†**
성균관대학교 화학공학과, *(주)극동전선 연구소, **성균관대학교 고분자공학과
(1998년 3월 6일 접수)

Post-operating Techniques for Non-taping Vulcanization Process of Electric Cable Sheath in Autoclave

Duk joon Kim, Sang Soon Choi* and Tae Ho Kim†**

Dept. of Chemical Engineering, Sung Kyun Kwan University, Suwon, Kyungki 440-746, Korea

**Dept. of Polymer Science & Engineering, Sung Kyun Kwan University, Suwon, Kyungki 440-746, Korea

*Kukdong Research and Development Center, Jincheon, Chungbuk 365-850, Korea

(Received March 6, 1998)

ABSTRACT

The determination method of successful operation conditions to control the temperature and pressure in autoclave after non-taping vulcanization process was represented. Heat and mass balances were constructed to predict the mass flow rates of air, steam, and condensed water into or from autoclave when the temperature and pressure in the autoclave were to be controlled in the desired profiles. The balance equations were solved by appropriate mathematics, and the solution was applied to an autoclave system where the temperature and pressure were linearly decreased. The resulting solutions were illustrated in graphs.

I. 서 론

Autoclave내에서 경화과정을 거친 전선피복용 고무재료는 가황 후 autoclave의 잠금문을 열 때 급냉에 의한 피복용 고무의 내부와 외부간의 온도차 및 순간적인 압력변화로 인하여 피복물의 외부에 손상이 가는 결과를 나타내는 경우가 많이 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 케이블을 부직포로 감싸 순간적인

온도 변화를 방지하고자 하는 노력을 해오고 있으나 (테이핑 가황) 이러한 운전작업은 많은 작업시간과 인력이 수반되어야 하므로 생산성 향상에 마이너스적인 효과를 가져오고 있다. Autoclave의 잠금문 개폐시 케이블외부 온도 및 압력의 급격한 강하는 케이블 내부와 표면의 온도 차이에 의한 열수축차이를 가져오게 되므로 테이핑처리를 하지 않은 채 냉각과정을 점진적인 방법으로 수행하여 이러한 현상을 최소화시킬 수 있다면(무테이핑 가황) 테이핑 가황의 단점을 보완할 수 있으리라 기대된다. 이러한 무테이핑 가황에

†대표저자

의한 경화를 무리없이 진행시키기 위해서는 autoclave 내부의 온도와 압력을 적절한 상태로 유지시키면서 가능한 천천히 감소시킬 필요가 있을 것이다. Autoclave내의 온도와 압력의 조절은 결국 적당한 냉각매체를 동원함으로써 가능할 것이며 이때 냉각매체의 현열과 잠열 그리고 증기압과 끓는점 등의 성질을 이용하여 autoclave를 계로 한 열 및 물질 수지를 확보하고 해석함으로써 시간에 따라 autoclave내로 또는 autoclave로 부터 인입, 배출되어야 하는 열매체와 냉각매체의 유량을 계산할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 무테이핑 경화공정시 일정한 시간을 두고 autoclave내의 온도와 압력을 원하는 상태로 변화시키려고 할 때 필요한 냉각매체인 건조공기의 인입량과 배출량, 열매체인 수증기의 배출량, 수증기로부터 응축된 응축수의 배출량 그리고 각 흐름선에서의 온도 등을 적당한 열 및 물질 수지로부터 구할 수 있는 방법을 제시하였다. 본 연구의 결과는 autoclave를 이용한 고무경화공정의 최적 작업조건을 얻는데 매우 중요한 기초자료가 될 것으로 기대된다.

II. 이 론

경화과정중 고온의 포화수증기로 가득차 있던 autoclave 내부의 온도와 압력을 경화후에 냉각건조공기를 인입하여 원하는 온도와 압력상태로 조절하려고 할 때, autoclave 내부에 존재하는 수증기와 건조공기의 질량 및 인입구와 배출구에서 출입되는 공기, 수증기 그리고 물 등의 양적 변화에 대한 물질 및 에너지 수지식을 아래와 같이 세울 수 있다.

1. 물질 수지식

경화공정 후 autoclave의 내부온도 및 압력, T 와 P_i 를 식 (1)과 같이 운전자가 원하는 시간, t 의 함수로서 변화시키려고 한다. 한편, 이때 온도 T 에 상응하는 수증기의 포화증기압, P_w 는 식 (2)와 같이 온도의 함수 형태로 주어진다.¹

$$T = f_n(t) \quad P_i = g_n(t) \tag{1}$$

$$P_w(T) = -0.207073 + 0.02535(T-273) - 0.0005499(T-273)^2 + 4.0378 \times 10^{-6}(T-273)^3 \tag{2}$$

Fig. 1은 autoclave 시스템에 인입, 배출되는 건조공기, 수증기, 응축수의 흐름을 나타내는 그림이다. 초기에 고온의 포화수증기로 채워져 있는 autoclave는 경화 후 온도 및 압력강하를 유도하기 위하여 일정한 온도 T_i 의 건조공기가 1번 흐름선을 통하여 인입된다. 인입된 공기는 내부의 수증기와 혼합되어 열을 빼앗으므로 공기의 온도는 상승하게 되고 빼앗긴 열량에 해당하는 만큼 약간 양의 수증기는 응축되어 3번의 흐름선으로 배출되게 된다. 한편 인입되는 공기의 양이 증가함에 따라 공기와 수증기의 혼합기체는 서로의 열교환에 의하여 autoclave 내부의 혼합온도의 변화(강하)를 가져오며 이를 위해서 적당한 양의 혼합가스는 흐름선 2를 통하여 배출되어야 한다.

Fig. 1과 같은 시스템에서 autoclave내에 축적되는 물질의 질량변화는 인입되는 물질의 질량속도와 배출되는 물질의 질량속도 차이와 같으므로, 공기와 수증기에 대한 물질수지식을 식 (3)과 (4)와 같이 세울 수 있다.

$$\frac{dm_a(t)}{dt} = \dot{m}_{a_1} - \dot{m}_{a_2} \tag{3}$$

$$\frac{dm_w(t)}{dt} = -\dot{m}_{w_3} - \dot{m}_{w_2} \tag{4}$$

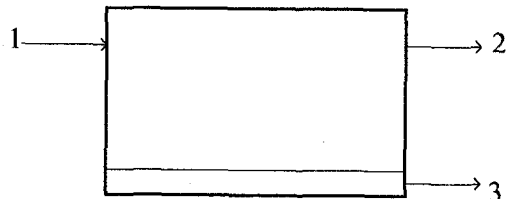


Fig. 1. Flow diagram of the autoclave reaction system.

여기서 $m_w(t)$ 와 $m_a(t)$ 는 각각 autoclave내에서 시간에 따라 변하는 수증기와 공기의 질량을, 그리고 \dot{m}_{a_1} 과 \dot{m}_{a_2} 는 흐름선 1과 2를 통하여 인입, 배출되는 공기의 질량속도, \dot{m}_{w_2} 과 \dot{m}_{w_3} 는 흐름선 2와 3을 통하여 배출되는 응축수와 수증기의 질량속도를 나타낸다.

2. 에너지 수지식

한편, Fig. 1과 같은 시스템에서의 에너지 수지식을 식 (5)와 같이 세울 수 있는데 식 (5)의 좌변은 기준 온도 T_i 로부터 현열과 잠열에 의한 autoclave 내부의 에너지 변화를 나타내고 있고 우변은 T_i 를 기준으로 전조공기의 인입, 배출에 따른 공기와 수증기 응축수의 에너지 변화를 나타내고 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{d\{m_w(t)[\lambda + C_{pl}(T - T_i)] + m_a(t)C_{pa}(T - T_i)\}}{dt} \\ &= -\dot{m}_{a_2}C_{pa}(T - T_i) - \dot{m}_{w_2}[\lambda + C_{pl}(T - T_i)] \\ & \quad - \dot{m}_{w_3}C_{pl}(T - T_i) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 λ 는 수증기가 응축수로 될 때의 잠열, C_{pa} , C_{pl} 은 공기와 물의 비열을 각각 나타낸다. 식 (6)은 식 (5)를 전개하여 표현한 식이다.

$$\begin{aligned} & \frac{dm_w(t)}{dt}[\lambda + C_{pl}(T - T_i)] + m_w(t)C_{pl}\frac{dT}{dt} \\ & \quad + \frac{dm_a(t)}{dt}C_{pa}(T - T_i) + m_a(t)C_{pa}\frac{dT}{dt} \\ &= -\dot{m}_{a_2}C_{pa}(T - T_i) - \dot{m}_{w_2}[\lambda + C_{pl}(T - T_i)] \\ & \quad - \dot{m}_{w_3}C_{pl}(T - T_i) - \lambda\dot{m}_{w_3} + m_w(t)C_{pl}\frac{dT}{dt} \\ & \quad + \dot{m}_{a_1}C_{pa}(T - T_i) + m_a(t)C_{pa}\frac{dT}{dt} = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

한편, 식 (3)과 (4)를 식 (6)에 대입하여 정리하면 식 (7)과 같은 간단한 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} & m_w(t)C_{pl}\frac{dT}{dt} + m_a(t)C_{pa}\frac{dT}{dt} \\ &= \lambda\dot{m}_{w_3} - \dot{m}_{a_2}C_{pa}(T - T_i) \end{aligned} \quad (7)$$

III. 결과 및 토론

1. 물질 및 에너지 수지식의 해

Autoclave내의 전체압력 P_t 는 수증기와 공기의 분압인 P_w 와 P_a 의 합으로 표현되며 각각의 분압은 실제 운전 압력이 5Kg/cm^2 을 넘지 않으므로 이상기체 상태방정식에 의하여 온도와 질량으로 표현이 가능하다.² 따라서 autoclave내의 수증기 질량, m_w 는 이상기체 상태방정식에 의하여 식 (8)과 같이 표현되어 질 수 있으며,

$$m_w(t) = \frac{P_w V M_w}{RT} \quad (8)$$

마찬가지로 공기의 분압(P_a)은 시스템의 전체압력, P_t 에서 수증기의 분압(P_w)을 뺀 것과 같으므로 autoclave내의 공기 질량(m_a)은 식 (9)와 같이 공기의 분압으로부터 계산되어 질 수 있다.

$$m_a(t) = \frac{V M_a}{RT} [P_t - P_w] \quad (9)$$

식 (8)과 (9)에서 R 은 기체상수, M_w 와 M_a 는 각각 수증기와 공기의 분자량, V 는 autoclave의 부피를 나타낸다.

한편 흐름선 2로부터 배출되는 수증기와 공기의 질량비는 autoclave 내부의 수증기와 공기의 질량비와 동일하므로 식 (10)과 같은 상관관계가 성립한다.

$$\frac{\dot{m}_{w_2}}{\dot{m}_{a_2}} = \frac{m_w(t)}{m_a(t)} = \frac{M_w P_w}{M_a (P_t - P_w)} \quad (10)$$

이제 물질 및 에너지에 관한 기본 수지식 (7)과 (3) 그리고 식 (4)에 식 (8)과 (9) 그리고 식 (10)을 대입하면 식(11)과 (12) 그리고 식 (13)을 차례로 얻을 수 있다.

$$\frac{P_w V M_w}{RT} C_{pl} \frac{dT}{dt} + \frac{V M_a}{RT} [P_t - P_w] C_{pa} \frac{dT}{dt} = \lambda \dot{m}_{w_3} - \dot{m}_{a_1} C_{pa} (T - T_i) \tag{11}$$

$$\frac{V M_a}{R} \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{T} (P_t - P_w) \right] = \dot{m}_{a_1} - \dot{m}_{a_2} \tag{12}$$

$$\frac{V M_a}{R} \frac{d}{dt} \left[\frac{P_w}{T} \right] = \dot{m}_{w_3} - \dot{m}_{w_2} = -\dot{m}_{w_3} - \frac{M_w P_w}{M_a (P_t - P_w)} \dot{m}_{a_2} \tag{13}$$

$$\begin{aligned} \frac{V M_a}{R} \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{T} (P_t - P_w) \right] &= \dot{m}_{a_1} + \frac{M_a (P_t - P_w)}{M_w P_w} \left[\frac{V M_a}{R} \frac{d}{dt} \left(\frac{P_w}{T} \right) + \dot{m}_{w_3} \right] \\ &= \left[\lambda \dot{m}_{w_3} - \left(\frac{P_w V M_w}{RT} C_{pl} \frac{dT}{dt} + \frac{V M_a}{RT} (P_t - P_w) C_{pa} \frac{dT}{dt} \right) \right] \frac{1}{C_{pa} (T - T_i)} \\ &\quad + \frac{M_a (P_t - P_w)}{M_w P_w} \left[\frac{V M_a}{R} \frac{d}{dt} \left(\frac{R_w}{T} \right) + \dot{m}_{w_3} \right] \end{aligned} \tag{15}$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_{w_3} &= \frac{\frac{V M_a}{R} \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{T} (P_t - P_w) \right] - \frac{M_a (P_t - P_w)}{M_w P_w} \left[\frac{V M_a}{R} \frac{d}{dt} \left(\frac{P_w}{T} \right) \right]}{\lambda + \frac{M_a (P_t - P_w)}{M_w P_w}} \\ &\quad + \frac{\frac{V}{RT} \left[P_w M_w C_{pl} \frac{dT}{dt} - M_a (P_t - P_w) C_{pa} \frac{dT}{dt} \right] \frac{1}{C_{pa} (T - T_i)}}{\lambda + \frac{M_a (P_t - P_w)}{M_w P_w}} \end{aligned} \tag{16}$$

식 (13)을 재정리하면 식 (14)와 같이 되고,

$$\dot{m}_{a_2} = -\frac{M_a (P_t - P_w)}{M_w P_w} \left[\frac{V M_a}{R} \frac{d}{dt} \left(\frac{P_w}{T} \right) + \dot{m}_{w_3} \right] \tag{14}$$

식 (14)를 식 (12)에 대입하여 \dot{m}_{a_2} 를 \dot{m}_{w_3} 에 대한 식으로 정리되고, 그 결과를 식 (11)에 대입하면 식 (15)과 같이 정리 되어진다. 따라서 흐름선 3으로 배출되는 응축수의 질량속도, \dot{m}_{w_3} 는 식 (15)의 재정리 되어진 식 (16)으로부터 구할 수 있다.

한편, 식 (16)의 결과로 얻어진 \dot{m}_{w_3} 를 식 (14)와

(13) 그리고 식 (12)에 차례로 대입함으로써 \dot{m}_{a_2} , \dot{m}_{w_2} 그리고 \dot{m}_{a_1} 등을 연속적으로 구할 수 있다.

2. 적용 사례

앞에서 언급된 몇가지 물질 및 에너지 수치식 등을 이용하여 4 Kgf/cm²(gauge), 152°C의 조건에서 무 테이핑 가황된 전선케이블을 가황 후 autoclave내의 온도와 압력을 Fig. 2의 (a), (b)와 같이 시간에 따라 선형으로 감소시키고, autoclave 내부의 수증기를 항상 포화상태로 유지하려고 할 때 autoclave내로 인 입되어야 하는 건조공기 및 autoclave로부터 배출되

어야 하는 공기, 응축수 그리고 수증기의 시간에 따른 질량속도, \dot{m}_{a_i} , \dot{m}_{a_e} , \dot{m}_{w_i} 그리고 \dot{m}_{w_e} 등을 계산해 보았으며, 또한 이때 autoclave내에 존재하는 각 물질성분의 질량을 시간의 함수로 구해 보았다. 본 예에서는 조업과정 중 autoclave 내부의 수증기 상태가 포화상태로 유지할 때의 물질 및 에너지 수지 결과를 살펴보았는데 그 이유는 실제로 autoclave내의 수증기 상태를 과포화 상태로 유지할 때는 포화압력에 해당하는 비점보다 높은 온도를 유지해야 하므로 압력을 적당히 낮춘 이후에도 잠금문을 열 때 autoclave 내외의 온도차이로 인하여 캐이블이 급냉되는 결과를 가져오게 될 가능성이 크기 때문이다.

$\Delta t(=20\text{분})$ 동안에 경화 후 autoclave내의 초기 수증기 온도인 $T_0(=425\text{ K})$ 에서부터 $T_f(=373\text{ K})$ 까지 떨어지는 Fig. 2(a)와 같은 autoclave내의 온도

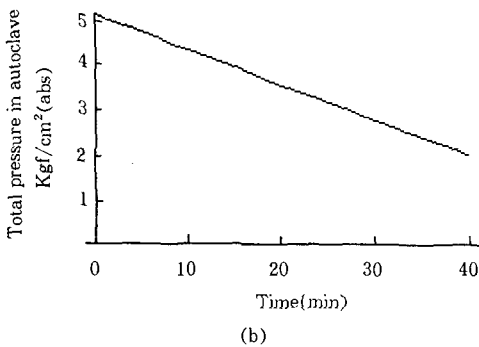
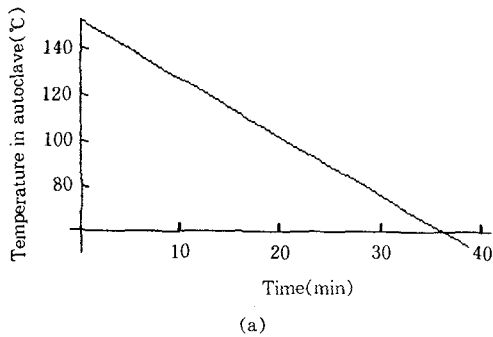


Fig. 2. (a) Desired temperature and (b) Desired pressure profiles in autoclave.

거동은 식 (17)로서 표현이 가능하며,

$$T = T_0 + \frac{(T_f - T_0)}{\Delta t} t \quad (17)$$

전체압력 P_t 는 $\Delta t(=20\text{분})$ 동안에 초기의 압력, $P_0(=4\text{ Kg/cm}^2(\text{gauge}))$ 에서부터 최종압력, $P_f(=2.5\text{ Kg/cm}^2(\text{gauge}))$ 로 감소시키려고 하는 경우 식 (18)과 같은 시간의 함수로 나타낼 수 있다.

$$P_t = P_0 + \frac{(P_f - P_0)}{\Delta t} t \quad (18)$$

이때 수증기의 포화증기압은 식 (2)와 같은 온도의 함수형태로 결정된다.

이제 수증기 및 응축수의 분자량, $M_w=18$, 공기의 분자량, $M_a=29$, 기체상수, $R=0.082 \times 10^{-3}\text{ atm m}^3/\text{gmol K}$, autoclave의 부피, $V=0.2\text{m}^3$, 응축수의 비열, $C_{pl}=1\text{ cal/g/}^\circ\text{C}$, 공기의 비열, $C_{pa}=0.238\text{ cal/g/}^\circ\text{C}$ 그리고 수증기의 응축잠열, $\lambda=540\text{ cal/g}$ 등의 값을 대입시키고 온도가 20°C 인 냉각매체인 공기를 인입시킨다고 하면 식 (16)으로부터 autoclave에서 응축되어져 흐름선 3으로 시간에 따라 배출되는 응축수의 질량속도, \dot{m}_{w_3} 를 계산할 수 있으며 이를 그림표로 나타낸 것이 Fig. 3이다.

또한 Fig. 4(a)와 (b)는 식 (14)와 (13)로부터 계산되어지는 흐름선 2중 공기와 수증기의 질량속도, \dot{m}_{a_2} 와 \dot{m}_{w_2} 를 각각 나타낸다.

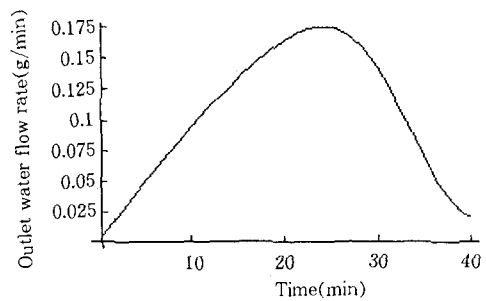
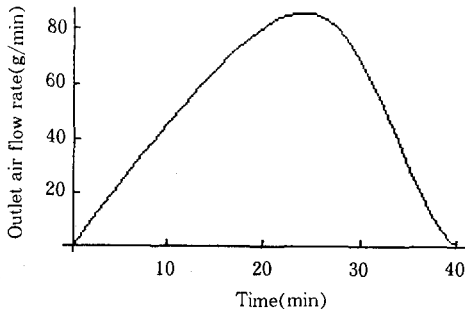
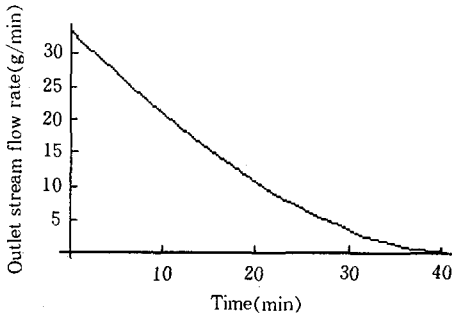


Fig. 3. Mass flow rate of condensed water from autoclave.



(a)



(b)

Fig. 4. Mass flow rate of (a) air and (b) steam from autoclave.

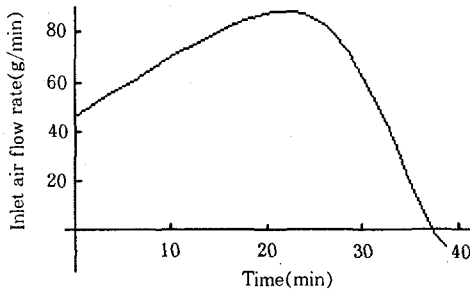
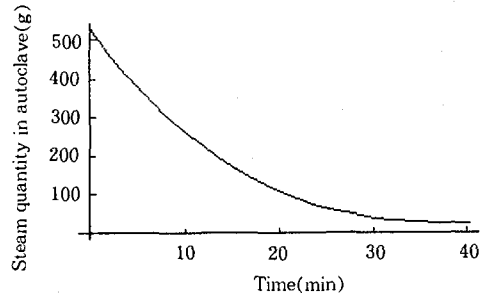


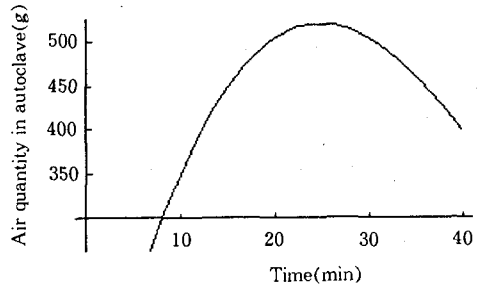
Fig. 5. Mass flow rate of air into autoclave.

Fig. 5는 식 (12)로부터 계산되어지는 인입공기의 질량속도, \dot{m}_a 을 시간의 함수로 나타내고 있다.

한편 식 (9)와 식 (10)에 의하여 계산되어지는 autoclave 내부에 존재하는 수증기와 공기의 시간에 따른 질량변화, m_w 와 m_a 는 Fig. 6의 (a)와 (b)에 나타내었다.



(a)



(b)

Fig. 6. Mass of (a) steam and (b) air in autoclave.

앞에서 적용한 예는 온도와 압력을 선형으로 감소시키고자 할 때 공기, 수증기 그리고 물의 인입 및 배출 질량유속을 계산하여 그 결과를 나타낸 것이나, 실제로 원하는 온도나 압력을 시간에 따라 비선형으로 변화시키고자 할 때에도 앞에서의 예와 마찬가지로 방법으로 그 관계를 식 (1)과 같은 적당한 함수로 표현하고 이를 식 (16) 및 식 (12)~(14)에 대입함으로써 \dot{m}_w , \dot{m}_a , \dot{m}_w , 그리고 \dot{m}_a 등을 시간의 함수형태로 구할 수 있다.

IV. 결 론

본 보문은 테이핑 또는 무테이핑 경화과정중 냉각처리시 급격한 압력 감소 및 냉각으로 인한 고무 케이블의 내외부 물성차이를 최소화하기 위하여 공기를 냉매로 하였을 때의 냉각처리 과정에서 시스템에 대한 물질 및 에너지 수지식등을 결정하

고 계산 프로그램을 작성, 전체 수지에 대한 해를 구해 보았다.

한 예로서 152°C, 4 Kgf/cm²(gauge)의 온도, 압력조건에서 경화된 전선케이블을 냉각시키는 과정에서 항상 autoclave내의 수증기를 포화상태로 유지하면서 20분 후에 100°C, 2.5 Kgf/cm²(gauge)의 온도, 압력이 되도록 시간에 대해 선형으로 온도와 압력을 낮추려고 할 때 각 흐름선에서 인입되는 건조공기, 배출되는 수증기, 공기 및 응축수의 질량 유속 및 시스템의 질량 변화를 설정된 열 및 에너지 수지식을 이용하여 구해 그 결과를 그래프로 나타내 보았다.

감사의 글

본 연구는 (주)극동전선의 후원아래 이루어졌음을 밝히며 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. R. H. Perry and C. H. Chilton, "Chemical Engineers' Handbook", 5th Ed., McGraw-Hill, Tokyo, 1973.
2. J. M. Smith and H. C. Van Ness, "Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics", 4th Ed., McGraw-Hill, 1986.