

급액속도가 원심식 박막증발기의 운전 특성에 미치는 영향

김병삼·박노현·박무현·한봉호*
한국식품개발연구원, *부산수산대학교

Effect of Feeding Rate for Operation Properties of Centrifugal Thin Film Evaporator

Byeong-Sam Kim, Noh-Hyun Park, Moo-Hyun Park and Bong-Ho Han*

Korea Food Research Institute

*Department of Food Science and Technology, National Fisheries University of Pusan

Abstract

During the evaporation of garlic juice by centrifugal thin film evaporator (Centri-Therm, CT-1B), the effect of feeding rate was investigated for its operation properties. On the process condition of feeding rate of 25 to 125 kg/h, theoretical average thickness of the garlic juice film on the rotating cone and residence time of the juice in the evaporator varied in the range of 0.52 to 0.89 mm and 1.77 to 6.75 second, respectively. And the flow of garlic juice was considered as a streamline flow by Reynolds number. At constant temperatures of steam and juice evaporation, concentration ratio decreased with the increase of the feeding rate. But the evaporation rate and overall heat transfer coefficient increased with the increase of the feeding rate until the feeding rate reached a certain value and then decreased. On the conditions of $25 \leq \text{feeding rate} \leq 125$ kg/h, evaporation temperature of 40°C , $95 \leq \text{steam temperature} \leq 120^\circ\text{C}$ and initial feed concentration of 32°Brix , concentration ratio and overall heat transfer coefficient were 1.04~2.04 and 3,074.33~17,614.70 $\text{kJ/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$.

Key words: centrifugal thin film evaporator (Centri-Therm, CT-1B), garlic juice, evaporation

서 론

마늘착즙처럼 점성이 높으면서 열에 민감한 식품의 증발농축에 있어서는 운전조건을 설정하기 위해서는 열 처리에 따른 품질저하를 고려하여야 한다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 개발된 증발기 중의 하나가 원심식 박막증발기(centrifugal thin film evaporator)로서 이 증발기는 원심력으로 증발관 내에서 피농축물의 박막을 형성시켜 피농축물과 가열 면의 접촉시간을 최소화시킨 장치이다. 최초의 원심식 박막증발기는 Hickmann에 의해 1950년대에 소개된 Hickmann film evaporator이며 오늘날 이용되고 있는 원심식 박막증발기는 외형적 구조에는 조금씩 차이가 있으나 근본적으로 모두 이 원리를 이용한 것이다⁽¹⁾. 그 후 Gudheim과 Donovan⁽²⁾은 실린더형과 원추형의 새로운 형태의 원심식 박막증발기를 소개하였으며 이들 증발기는 원심력에 의해 생성된 피농축물의 박막이 난류 혼합상태에서 증발되도록 한 것이다.

식품산업에 있어서 원심식 박막증발기에 대한 연구

예로는 사과주스⁽³⁾, 오렌지주스 및 레몬주스⁽⁴⁾, passion fruit juice와 같은 과일주스⁽⁵⁾를 비롯하여 효모추출액⁽⁶⁾, vitaminized juice⁽⁷⁾, lucerne leaf protein concentrate⁽⁸⁾, 맥주의 알콜 함량조절^(9, 11) 등 많은 연구가 행해져 왔다. 그러나 지금까지의 연구결과는 부분적인 연구결과에 그칠 뿐 공정 전반에 대해 검토한 보고는 찾아보기 어렵다. 따라서 저자 등은 마늘착즙을 시료로 하여 원심식 박막증발기에 있어서 운전조건에 따른 농축특성을 살펴보고자 하였다.

재료 및 방법

시료의 제조

시료인 마늘착즙은 1989년 7월 10일 경기도 화성군에서 수확한 6쪽 마늘(*Allium sativum*)을 전기착즙기(J-530S, 4,500 rpm, 삼성전자)로 착즙한 다음 200 mesh 표준체를 통과시키고 이를 고형물 농도 32°Brix 로 조절하여 사용하였다.

시험장치

본 연구에 사용된 시험장치는 전보⁽¹²⁾에서 보고한 원심식 박막 증발기(Centri-Therm, CT-1B, α -Laval Co. Sweden)를 이용하였다.

Corresponding author: Byeong-Sam Kim, Korea Food Research Institute, 148-1 Dangsoo, Panwol, Hwaseong, Kyonggi-do 445-820, Korea

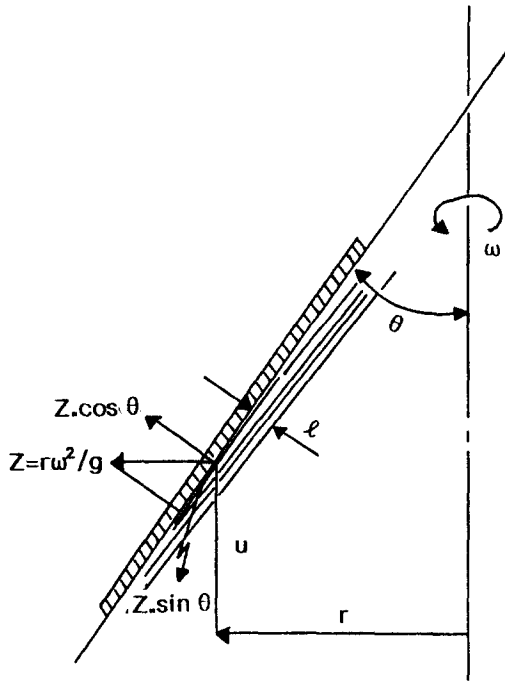


Fig. 1. Formation of centrifugal thin film

체류시간 및 박막의 두께 계산

원심식 박막증발기의 전열면에 있어서 박막의 형성원리는 Fig. 1과 같다. 그리고 증발관 내에서 피농축물의 두께 l 와 체류시간(residence time) T 는 다음 식 (1)과 (2)에 의해 구하였다.

$$l = \left(\frac{3 \mu_f V}{2 \pi r \rho g Z (\sin \theta)} \right)^{1/3} \quad (1)$$

$$T = A_r \cdot l / V \quad (2)$$

Reynolds number(Re)의 계산

Reynolds number는 다음 식 (3)에 따라 구하였다^(13,14).

$$Re = \frac{4\Gamma}{\mu_f} \quad (3)$$

총괄열전달계수의 계산

농축 공정 중 총괄열전달계수는 다음과 같이 구하였다.

$$U = \frac{F c_{pf} (T_e - T_f) + L H_v}{A_h (T_s - T_e)} \quad (4)$$

이 때 식 (4)에서 마늘착즙의 비열은 수분함량이 26% 이상되는 식품의 비열 추정치에 많이 이용되는 다음과 같은 Riedel의 식^(15,16)으로 계산하였다.

$$c_{pf} = 1.675 + 0.025X_m \quad (5)$$

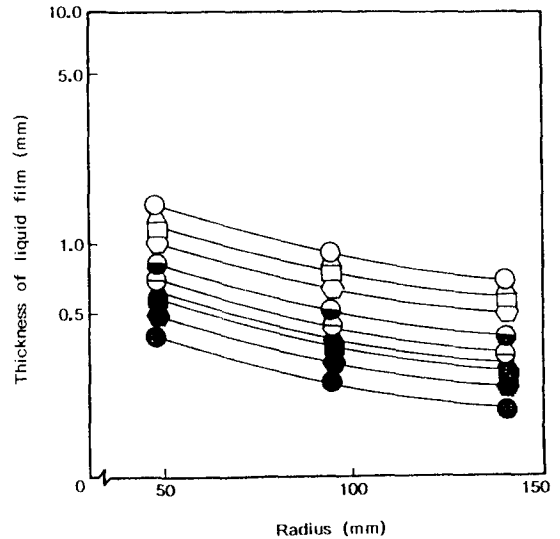


Fig. 2. Changes of thickness of liquid film in Centri-Therm (CT-1B)

Feeding rate: ●—● 25 kg/h, ○—○ 50 kg/h, □—□ 75 kg/h, △—△ 100 kg/h, ○—○ 125 kg/h. open: Garlic juice, filled: Water

결과 및 고찰

센트리덤에 있어서 액체필름의 두께 및 체류시간

Fig. 2에는 물과 마늘착즙의 급액속도에 따른 액체필름의 두께에 대한 이론적인 계산치를 나타내었다. 원심식 박막증발기의 경우 원료액은 증발원추면에 0.5~1.0 mm의 박막을 형성한다고 하는데⁽¹⁷⁾, 본 연구에서는 물과 마늘착즙의 경우 급액속도 25~125 kg/h의 범위에서 0.2~2.0 mm 두께의 박막을 형성하였으며 마늘착즙의 박막의 두께가 물의 그것보다 두꺼웠다. 이는 마늘착즙은 물과는 달리 고형물의 농도가 높고 고형물이 원심 침강하기 때문인 것으로 생각되었다.

액체필름의 두께가 어느 정도 이하로 얇아지면 표면장력의 영향을 무시할 수 없게 되어 액이 방울 형태로 되면서 박막이 끊기는 현상이 일어난다. 물의 경우 방울 형태가 되는 박막의 최소두께가 0.025~0.030 mm 정도이며 이 때 소량의 용질이 존재하면 계면활성효과에 의해 막끈김이 완화된다고 한다⁽¹³⁾. 실제 조작시에는 액의 증발 때문에 흐름 방향의 액량이 점차 감소하고 액체필름의 난류가 형성되거나 막액으로부터 증기의 물질이동이 일어나게 되어서 새로운 복잡한 관계가 성립되어 뒛 식에 의해 이론적으로 계산된 액체필름의 두께는 약간의 차이가 있다고 하는데⁽¹³⁾ 본 연구에서는 마늘착즙의 경우 막끈김 현상은 없는 것으로 생각되었다.

Fig. 3에는 물과 마늘착즙의 급액속도에 따른 이론적인 체류시간을 나타내었다. 급액속도를 25 kg/h에서 125 kg/h로 변화시켰을 때 체류시간은 물의 경우 0.88~3.36

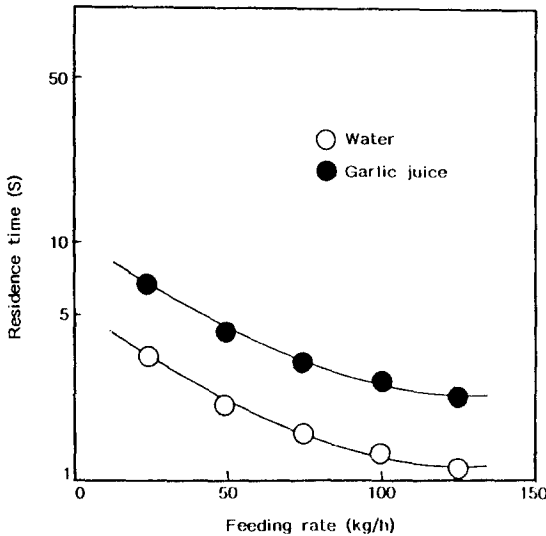


Fig. 3. Relationship between feeding rate and residence time

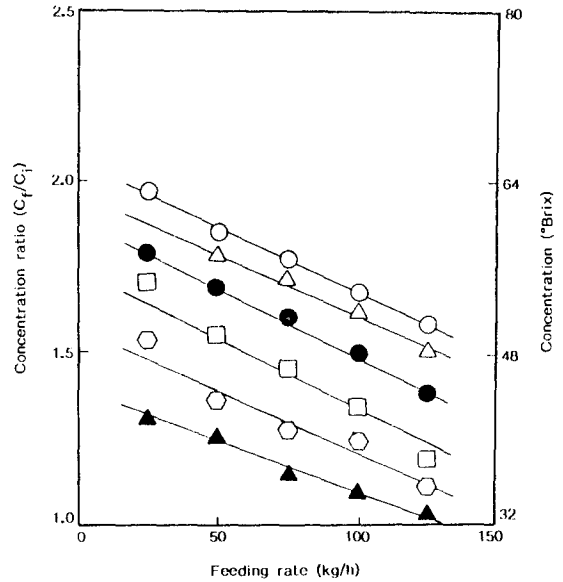


Fig. 4. Changes of concentration ratio during single pass type concentration of garlic juice

Table 1. Reynolds numbers for flow behavior during concentration of garlic juice at various feeding rates and temperatures

Temperature (°C)	Feeding rate(kg/h)				
	25	50	75	100	125
30	6.30	12.59	18.89	25.18	31.48
40	7.35	14.70	22.04	29.39	36.74
50	8.84	17.68	26.52	35.36	44.20
60	11.09	22.18	33.27	44.37	55.46
70	14.89	29.77	44.65	59.53	74.42

Operation condition: Initial feed conc.: 32°Brix, Initial feed temp.: 13°C, Evaporation temp.: 40°C, Pressure of evaporating cone; 7.12 kPa, Steam temp: ▲-▲ 95°C, ○-○ 100°C, □-□ 105°C, ●-● 110°C, △-△ 115°C, ◇-◇ 120°C

Table 1은 보통 급액속도 50 kg/h 이하에서는 급액 및 증발온도에 상관없이 완전한 층류현상을 보이기 시작하였다. 그러나 급액속도 100 kg/h, 증발온도 70°C 이상에서는 난류현상을 나타내었으며 급액속도 125 kg/h 이상, 증발온도 60°C 이상에서는 그런 현상이 더욱 현저하였다.

초, 마늘착즙의 경우 1.77~6.75초였다. 대체로 급액속도가 느린 경우 체류시간이 길게 나타나는데 이는 액이 증발관에 들어간 후 하부에서 어느 정도 모여야 paring tube를 통해 배출될 수가 있기 때문으로서 증발 원추의 하부의 holding volume 때문에 급액속도가 느린 경우가 상대적으로 오래 걸리는 것으로 여겨졌다. 또한 동일 급액속도에서 물보다 마늘착즙의 체류시간이 긴 것은 고형물이 원심 침강한 후 다시 원추 하부로 중력 침강하기 때문인 것으로 생각되었다.

급액속도가 농축비, 증발속도 및 총괄열전달계수에 미치는 영향

유체의 흐름 특성

일반적으로 하강 박막식 증발기(falling film evaporator)에서 필름의 Reynolds number에 따라 흐름영역을 대략 세 가지로 분류한다. 물의 경우 Re가 20~30 이하이면 완전한 층류 그리고 30~50에서 전이영역이 시작되며, 1,000~3,000에서는 완전한 난류가 형성된다. Reynolds number는 증기에 의한 층밀림이 무시될 때만 타당하다⁽¹⁴⁾.

센트리덤의 장점의 하나는 피농축액이 증발기를 1회 통과하는 것만으로도 높은 농축비를 얻을 수 있다는 것이다. Lazaro⁽¹⁸⁾는 Centri-Therm에서 8.5°Brix의 감귤쥬스를 1회 통과시킴으로서 71°Brix까지 농축할 수 있음을 보고하였고 Nong⁽³⁾은 Centri-Therm, CT-6에서 증발온도 50°C, 진공도 120 mmHg, 증기온도 105°C의 조건에서 감귤쥬스를 농축할 때 급액속도를 600 kg/h에서 1,400 kg/h로 변화시킴에 따라 농축비가 7.1에서 2.6까지 변화하였다고 보고하였다.

Fig. 4에는 급액속도의 변화에 따른 마늘착즙의 농축비의 변화를 나타내었다. 증발온도 40°C에서 마늘착즙을 single pass type으로 농축시켰을 때 농축비는 급액속도가 감소할수록 그리고 동일 급액속도에서는 가열매체의 온도가 높을수록 높았으며 본 연구 조건에서 최대 농축비는 약 2정도였다. 그러나 이러한 수치는 기존의

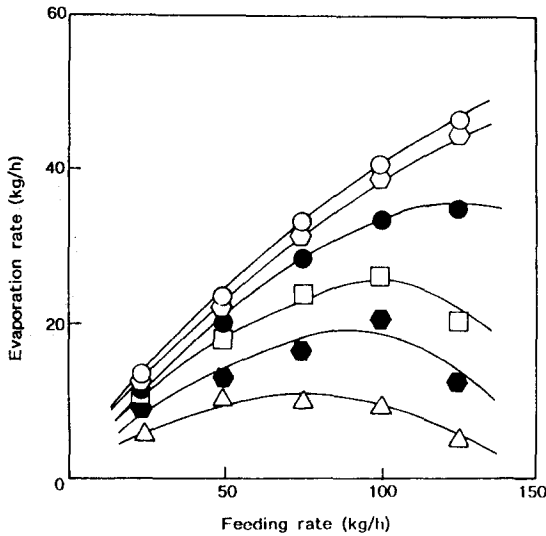


Fig. 5. Changes of evaporation rate during single pass type concentration of garlic juice
Operation condition and legends are the same as in Fig. 4.

자료나 장치 제작회사의 보고에 비해 상당히 낮은 값으로서 마늘착즙의 특성에 기인하는 것으로 생각되었다.

급액속도와 증발속도의 관계를 Fig. 5에서 보면 증발온도가 일정할 때 일정 급액속도까지 증발속도가 증가하거나 급액속도가 그 이상으로 빨라지면 증가폭이 둔화되고 급액속도가 더 빨라지면 증발속도가 오히려 감소하는 현상을 보였다. 이러한 현상은 과다한 급액에 따른 액체필름의 두께의 증가와 그 결과로 인한 가열매체로부터 액체로의 열전달 또는 액체 내부에서 증발 표면으로의 물질이동속도가 느려지기 때문인 것으로 여겨졌다. 즉 가열매체로부터의 열공급이 액체의 충분한 가열에 필요한 열량에 미치지 못하기 때문으로 생각되었다. 가열매체인 증기의 온도가 높을수록 그리고 급액속도가 빠른 조건에서도 증발속도가 계속 증가하는 것으로 보아 가열매체로부터 마늘착즙에 공급되는 열량이 충분한 경우에는 급액속도에 따른 액체필름의 두께에 기인한 열저항의 영향이 상대적으로 감소되는 것으로 생각되었다. 그러나 실제 농축액 펌프의 최대 토출속도가 129.24 kg/h이기 때문에 증발기 내에서의 농축액의 적체 및 이에 따른 파부하를 막기 위해 급액속도를 그 이하로 조절하는 것이 적절한 것으로 여겨졌다. 또한 증기의 온도를 지나치게 높일 경우 가압증기의 제조에 따른 에너지 소비가 커서 경제성의 저하를 초래하게 되어 본 연구에서는 최대 급액속도 125 kg/h, 최대 증기온도 130°C 이하에서 운전하였다. 본 연구에서 보면 급액속도 125 kg/h에서 증기온도가 120°C인 경우 증발수량이 46.41 kg/h으로 장치 제조업자가 제시한 최대 증발량인 50 kg/h와 거의 비슷한 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 6에는 피농축물의 급액속도와 증기온도의 변화에 따른 총괄열

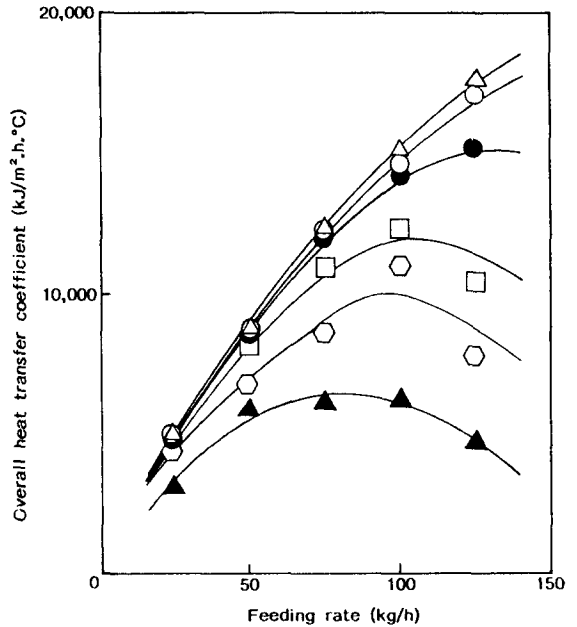


Fig. 6. Changes of overall heat transfer coefficient during single pass type concentration of garlic juice
Operation condition and legends are the same as in Fig. 4.

전달계수의 변화를 나타내었다. Fig. 6에서 보면 총괄열 전달계수도 Fig. 5에서의 증발속도와 동일한 경향을 나타내었다.

요 약

원심식 박막증발기를 이용해 마늘착즙을 증발 농축하면서 급액속도가 증발표면에서의 액의 흐름상태와 운전 특성에 미치는 영향에 대해서 조사하였다. 급액속도 25~125 kg/h의 운전 조건하에서 증발표면에서의 이론적인 박막의 두께는 0.52~0.89 mm 그리고 체류시간은 1.77~6.75초로 계산되었다. 한편 Reynolds number로 판단해 볼 때 증발표면에서의 마늘착즙의 흐름은 대체로 층류로 여겨졌다. 일정한 증기 및 증발온도 조건하에서 농축비는 급액속도가 증가함에 따라 감소한 반면 증발속도와 총괄열전달계수는 어느 일정한 값까지 증가하다가 감소하는 경향을 나타내었다. 그리고 급액속도 25~125 kg/h (증발온도 40°C, 증기온도 95~120°C, 급액의 초기농도 32°Brix)에서 농축비는 1.04~2.04, 총괄열전달계수는 3,074.33~17,614.70 kJ/m²·h·°C였다.

기호 설명

- A_c : 증발원추의 표면적(m²)
- A_h : 가열 원추의 표면적(m²)
- c_{pt} : 급액의 비열(kJ/kg·°C)

- F : 급액의 중량(kg/h)
- g : 중력 가속도(m/s²)
- H_v : 증발온도에서 수증기의 엔탈피(kJ/kg)
- L : 증발된 수증기의 양(kg/h)
- l : 액체 박막의 두께(m)
- n : 회전속도(rpm)
- Q : 총열유속(kJ/h)
- r : 회전축으로부터의 거리(m)
- T_e : 증발온도(°C)
- T_f : 급액온도(°C)
- T_s : 가열매체의 온도(°C)
- U : 총괄 열전달 계수(kJ/m²·h·°C)
- u : 액체의 평균 유속(m/s)
- V : 체적 속도(m³/s)
- X_m : 물의 중량 분율
- Γ : 흐름방향에 수직방향으로의 단위 길이당 급액 속도(kg/m·s)
- μ_f : 점도(kg·m·s)
- ω : 각속도(rad/s)

문 헌

1. Skocylas, A.: Thin film evaporator construction and performance. *British Chem. Eng.*, 12(8), 1235(1967)
2. Gudheim, A.R. and Donovan, J.: Heat transfer in thin film centrifugal processing units. *J. Chem. Eng. Prog.*, 53, 476(1957)
3. Nong, T.C.: Factors affecting the degree of concentration of apple juice in a centrifugal evaporator. *Przemysl Spozywczy*, 23(10), 438(1969)
4. Thormann, H.U.: The CENTRI-THERM evaporator in the fruit juice industry. *Gordian*, 72(1), 7(1972)
5. Fonseca, J.L.F. DA: Concentrated passion fruit juice. *Boletim Tecnico Do Ceped*, 3(3), 31(1976)
6. Pajunen, E., Vanhatalo, I., Linko, M. and Passa, E.: Concentration of yeast extract with a centrifugal film evaporator. Tech Res. Centre of Finland. Biotech. Lab. Helsinki, Finland. *The 6th International Congress of Food Science and Technology*, 6, 13(1974)
7. Mrozewski, S., Jarczyk, A. and Krupinski, W.: Experiments on the concentrated vitaminized juice production. *Przemysl Spozywczy*, 25(1), 10(1971)
8. Traegardh, C.: Production of leaf protein concentrate for human consumption by isopropanol treatment. A comparison between untreated raw juice and raw juice concentrated by evapoartion and ultrafiltration. *Lebens.Wissen. u Technol.*, 7(4), 199(1974)
9. Kruger, E., Oliver-Daumen, B., Sommer, G., Metscher, M. and Berger, H.: Manufacture of beers with a reduced alcohol percentage. *Monatsschrift fuer Brauerei*, 33 (11), 422(1980)
10. Pawlik, S., Dabrowska, W., Pronczuk, A. Kolbarczyk, A., Skrzypek, J. and Zgiernicka, A.: Selection of factors preventing protein coagulation in dried milk products when dissolved in hot water. *Roczniki Instytutu Przemyslu Mleczarskiego*, 21(2), 5(1981)
11. Oliver-Daumen, B.: Practical experience with use of Centri-Therm equipment for reduction of the alcohol content of beer. *Monatsschrift fuer Brauerei*, 35(3), 101 (1982)
12. 박노현, 김병삼, 박무현, 한봉호, 배태진 : 컴퓨터를 이용한 원심식 박막증발기의 제어 및 자료수집 시스템의 제작. *한국식품과학회지*, 22, 479(1990)
13. 久保田濃, 五師功仁 : 熱感受性の強い液體の蒸發. 濃縮裝置. *製藥工場*, 5(6), 482(1985)
14. Robert, H.: Evaporation, mebrane filtration and spray drying in milk powder and cheese production. *North Eur. Dairy J.* Coprnhagen, p.37(1985)
15. Riedel, L.: Calorimetric investigations of the freezing of fish meat. *Kaltetechnik*, 8(12), 374(1956)
16. Riedel, L.: Calorimetric investigations of the meat freezing process. *Kaltetechnik*, 9(2), 38(1957)
17. 保坂秀明 : 食品製造裝置百科辭典. 食品製造裝置百科辭典編纂委員會編, 東京, 日本, 231(1988)
18. La'zaro M.: Evalanation of the pilop evaporator minute centri-therm model CT-1B. *Industria Alimenticia*, 1(4), 39(1968)

(1991년 4월 1일 접수)