

## Ohmic Heating을 이용한 두유박의 압착탈수

조원일 · 변유량 · 이윤수\* · 권익부\*

연세대학교 식품·생물공학과, 생물산업소재연구센터

\*롯데그룹 중앙연구소

### Dewatering of Soybean Milk Residue by Hydraulic Press with Ohmic Heating

Won-Il Cho, Yu-Ryang Pyun, Youn-Soo Lee\* and Ik-Boo Kwon\*\*

Department of Food and Biotechnology and Bioproducts Research Center, Yonsei University

\*Lotte Group R & D Center

#### Abstract

In order to develop a novel dewatering process for soybean milk residue, hydraulic press with ohmic heating was built and its expression conditions were examined. The electric conductivity of raw soybean milk residue was 0.128 S/m and increased linearly with increasing temperature. Water content of the residue could be reduced to 74% with the conventional hydraulic press, but to less than 70% by applying ohmic heating to the hydraulic press. The most effective dewatering was achieved by applying alternative current with 5 kHz frequency at 60 V during expression. The solid content of the expressed liquid was markedly reduced from 10% to 3.3% by ohmic heating during expression. Temperature of the cake rose to above 95°C during the dewatering due to ohmic heating.

Key words: soymilk residue, hydraulic pressing, ohmic heating

#### 서 론

두부 및 두유 생산 공정에서 분리되는 두유박(비지)은 단백질, 식이섬유 등의 함량이 높은 우수한 영양소재임에도 불구하고 현재 동물 사료로 일부 이용될 뿐 대부분 폐기되고 있다. 특히 두유박은 수분 함량이 80%로서 매우 높고 단백질, 탄수화물 등 영양 성분이 풍부하기 때문에<sup>(1,2)</sup> 잡곡이 번식하여 쉽게 부패되므로 공해 문제도 발생하여 두유박을 처리하는데 관련 회사들은 큰 어려움을 겪고 있다.

두유박의 재활용성을 높이기 위해서는 가장 먼저 해결하여야 하는 문제는 보존성을 높일 수 있는 탈수 공정의 개발이다. 효율적인 탈수, 건조 공정이 집중적으로 연구되어 왔으나<sup>(3,6)</sup> 높은 보수성, 결합수의 다수 존재, 치밀한 조직 등으로 인해 효율적인 탈수 공정은 개발되지 못하고 있다<sup>(7,8)</sup>.

압착 탈수공정의 한계를 극복하기 위한 방법의 하나가 식품의 전기적 특성을 이용한 신기술인 ohmic heating이다. Ohmic heating 압착법은 직류, 교류 공급 전원에 따라 나눌 수 있으며, 탈수원리도 다르다. 극성 분자인 물의 이동을 극대화시켜 탈수 효과를 상승시키는 직류전원은 압착없이도 탈수가 일어난다는 장점이 있다. 그러나 직류전원을 이용한 전기 침투탈수법은 전극에서 극성 분자의 전기분해 현상에 의한 유해 물질의 생성 및 pH의 급격한 상승 즉 알칼리화를 야기시키는 단점이 있다<sup>(9)</sup>. 그에 반해 식품의 전기 저항에 의해 발생하는 Joule열이 탈수의 주요인인 교류전원은 극성의 빠른 변환에 의해 전기분해 현상을 현저히 낮출 수 있으며, 전압 및 주파수, 파형 등 전기적 요소의 변환이 쉽다는 등 여러 장점이 있다<sup>(9,10)</sup>.

본 연구에서는 이러한 점을 고려하여 새로운 식품 가공 기술인 ohmic heating을 이용하여 두유박의 탈수 효율을 극대화시킬 수 있는 방법을 연구하였다. 압착 압력, 압착 시간, 시료량, 교류 전압 및 주파수 등이 두유박의 압착 효율에 미치는 영향을 검토, 분석하였다.

Corresponding author: Yu-Ryang Pyun, Department of Food and Biotechnology, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

재료 및 방법

실험 재료

L社 두유 공장에서 생산되는 수분함량 79~80%, pH 7.0의 두유박을 시료로 사용하였다. L社의 최종 여과기에서 배출되는 약 86°C의 신선한 두유박을 플라스틱 필름 봉지에 채취하여 급냉시킨 후 5°C의 냉장고에 보관하면서 실험에 사용하였다.

실험 장치 및 구성

탈수 압착기의 개략도는 Fig. 1과 같으며, 5~50 kg/cm<sup>2</sup>의 압력을 낼 수 있는 유압식 압착기(hydraulic press)를 사용하였다. Fig. 1의 압착 실린더는 초강력 P.V.C로 제작하였으며, 실린더 하부에 지름 2 mm의 구멍을 뚫은 다공판을 설치하였다. 압착하면서 저주파 교류전류를 통하기 위하여 알루미늄 다공판과 피스톤을 각각 전원에 연결하였다. Ohmic heating용 전원공급부는 0에서 130 V의 전압을 낼 수 있는 정격 용량 2 kW, 60 Hz 슬라이드스스로 이루어져 있다.

이와 별도로 변환 주파수의 영향을 고찰하기 위해 40 Hz~20 kHz의 주파수와 0~100 V 전압을 가진 구형파(square wave), sine파를 발생시킬 수 있는 정격 용량 0.5 kW의 주파수 변환 전원 공급 장치를 자체 제작하여 실험에 사용하였다<sup>(10)</sup>.

실험 방법

압착 실린더의 다공판에 여포를 덮고 시료 100~200 g을 채운 다음 다시 여포를 덮고 유압 실린더를 밀어 올려 일정한 압력을 유지하면서 압착하였다. 단순히 압력에 의해서만 압착하거나 압력을 가해주는 동시에

저주파 교류를 통하면서 압착하였으며, 압착 실린더 하부로 배출되는 압착 즙액량을 측정하였다.

이때 시료 및 압착 cake의 pH 및 전기 전도도는 측정 시료 10 g에 80 ml의 증류수를 첨가하여 현탁 상태로 만든 후, pH meter (model 420A, ORION, Japan)와 electrical conduct meter (model CM-2A, Tokyo TOA Electronics Ltd., Japan)를 사용하여 측정하였으며, 압착 즙액의 경우는 바로 그 상태에서 측정하였다. 전류, 전압 등의 전기적 요소들의 측정은 digital multimeter (model 3500T, DM 303 TR, Hc, Korea) 2대를 이용하였다.

결과 및 고찰

가압조건이 탈수 효과에 미치는 영향

두유 공장에서 얻어지는 생두유박의 추출잔사의 초기 수분함량은 약 80%이다. 이 시료 130 g을 압착 실린더에 충전하고 압착 압력과 압착 시간이 탈수 효과에 미치는 영향을 검토하였다. Fig. 2는 압착 압력의 증가에 따른 압착 케이크의 수분함량의 변화를 나타낸 것으로 초기 약 5분 동안에는 비교적 빨리 압착되었으나, 그 후는 압착 시간에 따라 거의 직선적으로 완만히 압착되었다.

압착 압력이 탈수 효과에 미치는 영향을 비교하기

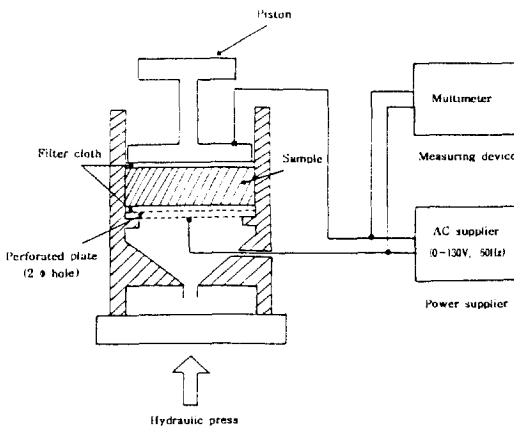


Fig. 1. Schematic diagram of hydraulic press unit using ohmic heating

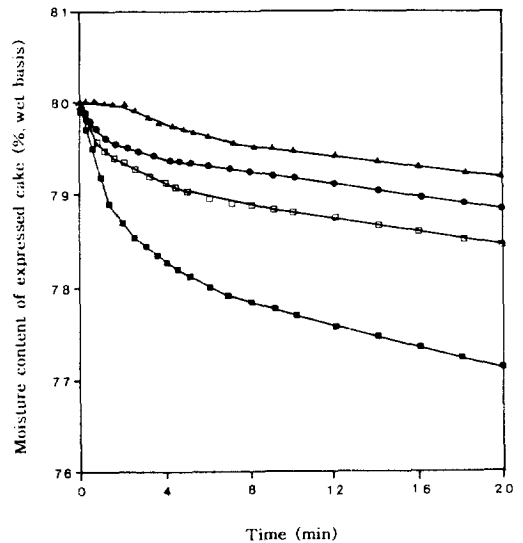
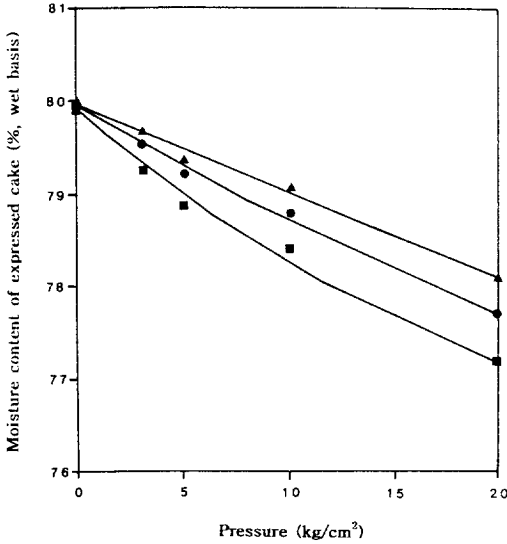


Fig. 2. Effect of pressure on the dewatering of raw soybean milk residue by hydraulic press (Sample weight: 130 g, Initial thickness of sample: 15 mm) ▲—▲; 3 kg/cm<sup>2</sup>, ●—●; 5 kg/cm<sup>2</sup>, □—□; 10 kg/cm<sup>2</sup>, ■—■; 20 kg/cm<sup>2</sup>



**Fig. 3.** Effect of pressure on the dewatering of raw soybean milk residue for different pressing time by hydraulic press (Sample weight: 130 g, Initial thickness of sample: 15 mm) Pressing time : ▲—▲; 5 min, ●—●; 10 min, ■—■; 20 min

위하여 각 압착 압력에서 5분, 10분 및 20분 압착한 후 압착 cake의 수분 함량을 Fig. 3에 나타내었다. 압착 압력이 5~20 kg/cm<sup>2</sup> 범위에서 증가하였을 때 압착 케이크의 수분함량은 초기 수분함량에 비하여 단지 2~2.5%만이 감소되어 압착압력 증가의 효과는 적었다.

한편 압착 실린더에 충전하는 시료량 즉 시료의 두께가 탈수 효과에 미치는 영향을 Table 1에 나타내었다. 이때 사용한 압착 실린더의 지름은 100 mm이다. 초기 충전량의 두께가 15 mm(충진량 130 g)까지는 두께가 증가할수록 압착축액량이 증가하였으나 두께 20 mm일 때는 압착축액량이 오히려 감소하였다. 이는 두유박의 조직이 매우 치밀하여 두께가 두꺼워지면 압력에 의해 분리된 수분이 내부에서 외부로 이동하는데 이동거리가 길고 저항을 많이 받기 때문인 것으로 생각된다. 한편 압착 케이크의 수분함량을 보면 두께 15 mm 이하에서는 시료 두께가 얇을수록 압착 효율이 증가되어 8 mm일 때는 73.71%로 감소되었으나, 15 mm일 때는 77.08%, 20 mm일 때는 78.25%로 거의 압착되지 않았다.

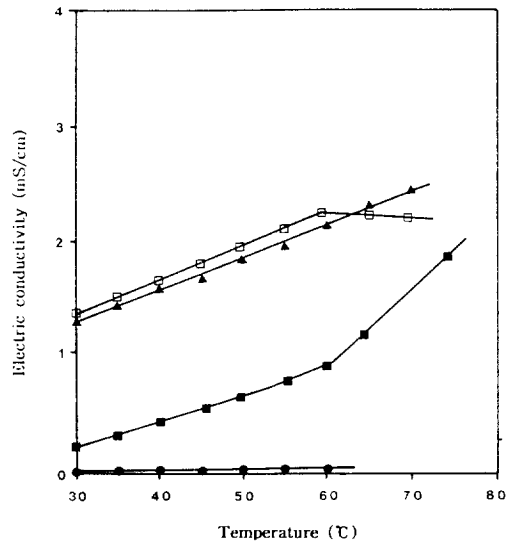
전반적으로 초기 수분함량에 대하여 단지 1~5%만이 감소되어, 기계적 압착 공정만으로는 효율적으로 탈수가 되지 않는다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 것은 두유박은 단백질, 섬유질, 다당류, 지방산 등 수화성이 큰 성분으로 구성되어 있어 보수력이 크기 때문이다<sup>(11,12)</sup>. 일반적으로 두유박의 압착 평형 함수율은

**Table 1.** The effect of sample thickness (weight) on the dewatering of raw soybean milk residue<sup>1)</sup>

Filling weight (g)	Initial thickness (mm)	Thickness after expression <sup>2)</sup> (mm)	Moisture content of expressed cake (%)	Volume of expressed liquid (ml)
70	8	5	73.71	6.0
130	15	14	77.08	11.5
200	20	18	78.25	7.2
300	40	35	78.29	6.4

<sup>1)</sup>Sample: raw soybean milk residue, initial moisture=79.2%

<sup>2)</sup>Expression condition: pressure=5 kg/cm<sup>2</sup>, pressing time=10 min



**Fig. 4.** Variation of electric conductivity of soybean milk residue during ohmic heating □—□; mashed potato, ▲—▲; raw soybean milk residue, ■—■; potato, ●—●; distilled water

60% 내외로서, 이 값은 압착에 의하여 제거할 수 있는 하한값이라 생각할 수 있다.

식품에 교류 전류를 통과시킬 때 가장 중요한 성질은 식품의 전기 전도도이다. 일반적으로 물질의 전기 저항은 온도에 따라 변하며, 금속의 전기저항은 온도가 증가함에 따라 증가하는 반면 식품은 감소한다<sup>(13)</sup>. Fig. 4는 두유박의 온도에 따른 전기전도도의 변화 양상을 다른 식품의 경우와 비교하여 나타낸 것이다. 대부분의 식품은 적당량의 이온염이 용해된 유리수를 함유하고 있으므로 전기 도체의 특성을 나타낸다. Fig. 4에서 알 수 있는 것처럼 생체 조직을 그대로 유지하고 있는 감자의 경우 세포벽이 전기저항의 주요인으로 작용하기 때문에 전기전도도가 비교적 낮으나 마쇄에 의하여 세포벽이 파괴되어 단백질, 탄수화물, 극성 아

미노산, 이온염 등이 유출된 두유박과 감자박의 전기 전도도는 0.128~0.132 S/m로서 6배 정도 크다. 두유박의 전기전도도는 마쇄한 감자와 비슷한 0.128 S/m 범위였으며, 온도가 증가함에 따라 증가하였다.

전기 저항을 가진 식품에 교류 전류를 통하면 주열열이 발생하게 되는데, 온도가 증가함에 따라 이온들의 운동이 활발해져 전기전도도가 증가하게 된다. 이것은 자유전자의 이동으로 열이 발생하는 금속의 가열기작과는 다른 식품의 독특한 전기적 특성이다<sup>(14)</sup>.

Ohmic heating을 이용한 압착

생두유박을 10 kg/cm<sup>2</sup>의 압력으로 압착하면서 60 Hz, 100 V의 일반 교류를 시료 150 g에 통했을 때 탈수기 내부에서의 전기적, 물리적 인자들의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 초기 8분 동안에 급속히 탈수되고 그 이후는 완만히 탈수가 진행되었다. 발생 열량도 초기 8분 동안에 급속히 증가하여 재료의 온도를 상승시켜 10분부터 수증기가 발생하였으며, 탈수기 내부의 압력은 발생 수증기압에 의해 증가하였다. 10분 이후는 탈수로 인해 시료 내의 수분이 급격히 감소되었기 때문에 전류도 급격히 저하되었다.

Fig. 6은 생두유박을 기계적 압착만 했을 때와 기계적 압착과 동시에 ohmic heating 했을 때의 압착즙액을 비교하여 나타낸 것이다. 기계적 압착을 했을 때 압착즙액량은 압착 시간에 따라 직선적으로 완만히

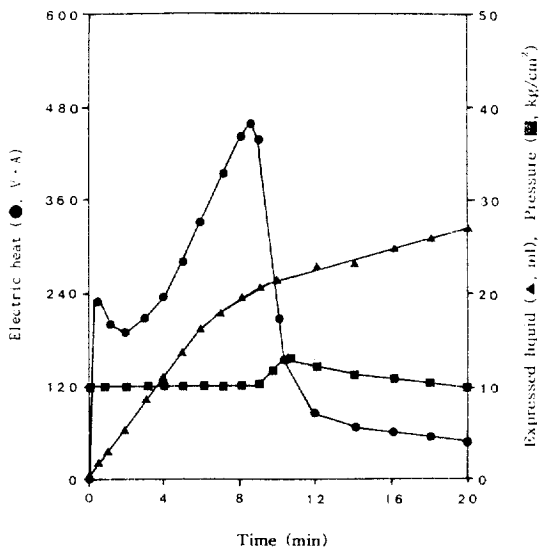


Fig. 5. Dewatering profile of raw soybean milk residue during hydraulic expression with ohmic heating (Sample weight: 150 g, 100 V, 60 Hz, Hydraulic pressure: 10 Kg/cm<sup>2</sup>)

증가하였으며, 압착 시간 12분 후에는 즙액 생성량이 감소하였으며, 약 10 ml/의 즙액이 압출되었다. 한편 압착과 동시에 교류 전류를 통하였을 때는 초기 8분 동안에 압출 즙액량이 급격히 증가하고 그 이후 완만

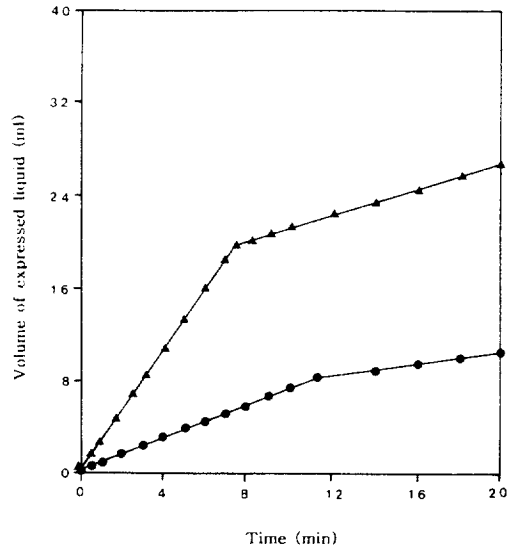


Fig. 6. Comparison of dewatering effect of raw soybean milk residue (pH 7.0) by hydraulic expression with and without ohmic heating (Sample weight: 150 g, ohmic heating: 100 V, 60 Hz, hydraulic pressure: 10 Kg/cm<sup>2</sup>)

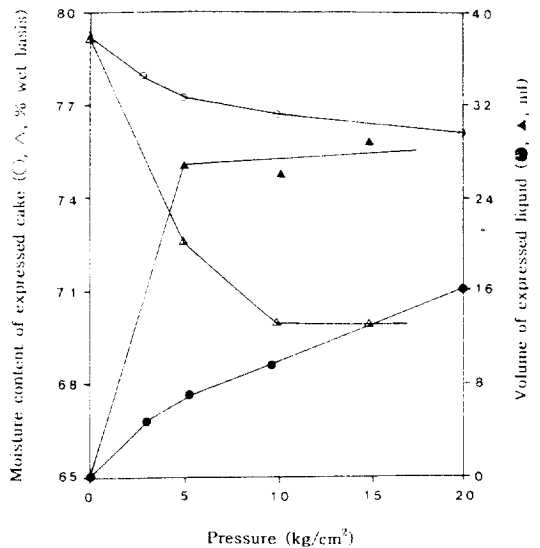


Fig. 7. The effect of pressure on the dewatering of soybean milk residue by hydraulic expression with ohmic heating (Sample weight: 130 g, Pressing time: 20 min, Sample pH: 7.0) ○—○, ●—●; Hydraulic expression, △—△, ▲—▲; Ohmic heating expression

하게 탈수되어 기계적 압착의 경우보다 약 2.4배의 즙액량이 생성되었다.

생두유박을 20분간 100 V 교류를 통하면서 압착하였을 때 압착 압력이 탈수 효과에 미치는 영향을 Fig. 7에 나타내었다. 압착 압력 10 kg/cm<sup>2</sup>까지는 압력의 증가에 따라 탈수량이 급격히 증가하여 압착 케이크의 수분함량이 70%에 도달하였으나 그 이상의 압력에서는 압력 증가의 영향이 없었다. 또한 압착 압력이 5 kg/cm<sup>2</sup>에서 10 kg/cm<sup>2</sup>로 상승될 때 수분함량의 변화는 현저하지만 압착즙액량이 증가하지 않고 일정한 이유는 압착 압력의 증가에 따른 전극 부분과 시료의 밀착 및 시료 두께 감소로 통전 전류량의 증가를 가져오고 이러한 전류량 증가는 빠른 시간내에 더 많은 Joule열을 발생시켜 많은 수분이 초기에 수증기 상태로 증발되기 때문이다.

교류 전압의 영향

교류를 걸어 주면서 압착하였을 때 전압이 생두유박의 탈수 효과에 미치는 영향을 Fig. 8에 나타내었다. 압착 케이크의 수분함량은 압력이 증가함에 따라 거의 직선적으로 감소하여 전압의 증가에 따라 효과적으로 탈수된다는 사실을 알 수 있다. 100 V 이상의 전압에서는 높은 전압에 의해 초기에 너무 많은 전류가 흘러 전극 부위에 spark 및 cake화를 가져와 전류의 흐름이 방해되어 오히려 탈수 효과가 감소하였다.

압착즙액량은 30 V까지는 급격히 증가하였으나 30 V 이상의 전압에서는 탈수량의 증가에 비하여 압출되

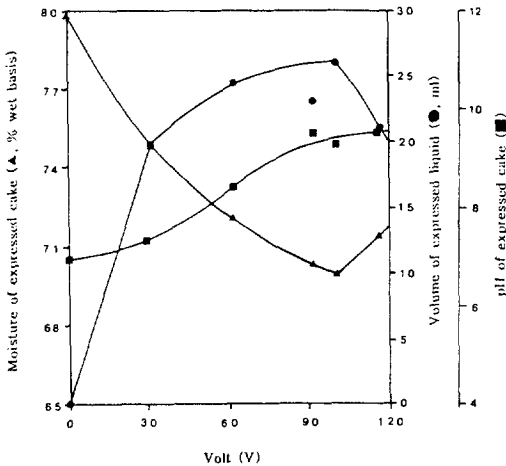


Fig. 8. The effect of voltage of alternating current on the dewatering of soybean milk residue by hydraulic expression with ohmic heating (Pressing time: 20 min, Pressure: 10 kg/cm<sup>2</sup>, Sample pH: 7.0, Sample weight: 150 g)

는 즙액량의 증가가 적은 것은 압착하는 동안에 ohmic heating에 의하여 두유박이 가열되어 일부 수분이 수증기로 증발되기 때문이다.

한편 압착즙액 중의 고형분 함량은 전압이 증가함에 따라 감소하였으며 사용 전압이 75 V일 때 3.3%로서 단순히 생두유박을 기계적 압착했을 때의 10.04%보다 현저히 낮았다. 이는 발열에 의한 단백질의 응고, 두유박 조직의 연화때문인 것으로 생각된다.

또한 여러 전압의 교류 전류를 통하면서 압착 후 압착 케이크의 pH를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에서 알 수 있는 것과 같이 전압이 증가함에 따라 압착 케이크의 pH가 약간 상승하는 경향을 보였다.

교류 주파수의 영향

상술한 결과와 같이 압착 탈수하는 동안에 교류 전류를 통함으로써 탈수 효율을 증대시킬 수 있지만 전압 조절만으로는 탈수 효율의 향상에는 작업 안정성, 전극 부위의 cake화 문제 등으로 인해 한계가 있다. 그러나 낮은 전압에서도 주파수를 높이면 식품의 임피던스가 저하되어 많은 전류가 흘러 발열량이 증가한다. 따라서 주파수, 전압, 파형 등의 전기적 요소를 조절할 수 있는 실험용 power supply를 자체 제작하고 주파수의 영향을 검토하여 Fig. 9와 같은 결과를 얻었다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 50 g의 시료에 60 V 전압의 구형파(square wave)를 가할 때 주파수가 증

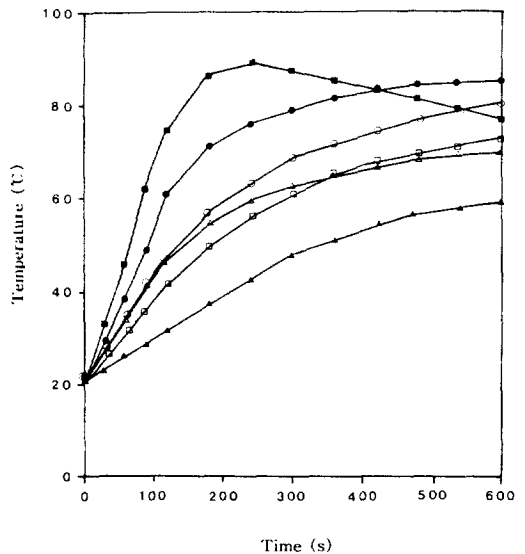


Fig. 9. Variance of heating rate with frequency during hydraulic expression of soybean milk residue with ohmic heating ▲—▲; 40 Hz, △—△; 120 Hz, □—□; 500 Hz, ○—○; 1 kHz, ■—■; 5 kHz, ●—●; 10 kHz

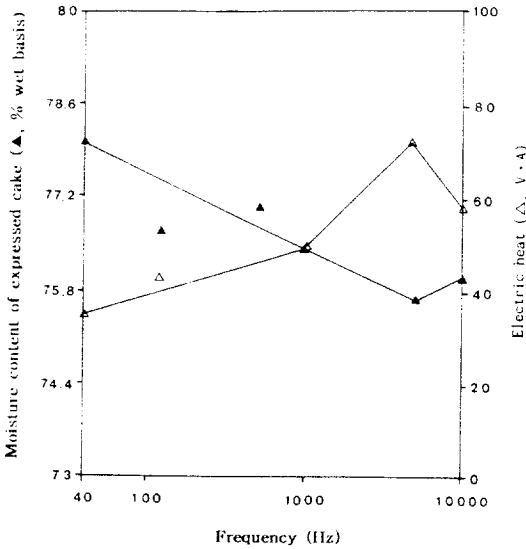


Fig. 10. Effect of frequency of alternating current on the dewatering of soybean milk residue by hydraulic press with ohmic heating

가함에 따라 가열 속도가 증가하였으며, 주파수가 5 kHz일 때 온도 상승이 가장 빨랐고 최대 열량이 발생되었다. 또한 수분 함량의 변화를 Fig. 10에서 살펴보면 5 kHz의 높은 주파수 부근에서 가장 많은 발열로 인해 탈수량도 최대가 되었다.

그 밖에 주파수가 증가함에 따라 전극 부위의 오염 및 전기분해 현상도 감소한다는 사실도 확인할 수 있었다. 이러한 결과에서 주파수 변환 저주파 교류 가열법이 고정 주파수의 경우보다 탈수 효율 및 제품의 품질 상승을 가져올 수 있을 것으로 기대된다.

## 요 약

두유 및 두부 공장의 부산물로 생산되는 두유박을 식이섬유원 또는 식품용 소재로 유효하게 이용하기 위한 연구의 일환으로 저장성을 증가시킬 수 있는 탈수 공정에 대한 연구를 수행하였다. 유암식 압착 탈수기를 이용하여 압착 압력, 시간, 시료량 등이 탈수 효과에 미치는 영향 및 ohmic heating을 이용한 압착탈수 효과 등을 검토, 고찰하였다.

단순가압에 의한 두유박의 탈수 조건을 검토한 결과 압착 압력 5~20 kg/cm<sup>2</sup> 범위에서 압착 압력이 증가할수록 탈수 효과는 거의 직선적으로 증가하였으며, 압착 실린더에 시료의 충전 두께가 15 mm 이상일 때 압착 효율이 매우 낮았다. 가압에 의한 압착으로는 초기 수분함량 약 80%에서 단지 74~78% 정도까지만 감

소시킬 수 있어 기계적 압력만으로는 효율적으로 탈수되지 않았다.

생두유박을 10 kg/cm<sup>2</sup>의 압력으로 압착하면서 60 Hz, 100 V의 일반 교류를 통하였을 때 초기 10분 동안에 급속히 탈수되었으며, 그 이후는 완만히 탈수가 진행되었다. 교류통전 압착시 기계적 압착에 비해 압착즙액량이 2.4배 증가하였으며, 압착 케이크의 수분 함량은 70%까지 감소시킬 수 있었다. 또한 Joule열에 의하여 두유박은 급속히 가열되어 살균 효과를 얻을 수 있었다.

상용 주파수(60 Hz)에서 전압을 변화시켰을 때 100 V에서 가장 효과적인 탈수가 일어났으며, 60 V의 고정 전압에서 주파수 변환 시는 5 kHz가 가장 효율적이었다.

## 문 헌

1. 강경환, 이두식 : 콩비지 재활용에 관한 연구. 식품과학과 산업, 24(1), 31 (1991)
2. Johnson, L.A., Deyoe C.W. and Hoover, W.J.: Yield and quality of soymilk processed by steam-infusion cooking. *J. Food Sci.*, 46, 239 (1981)
3. 정성수, 장호남, 박무영 : 압착여과와 열풍에 의한 비지의 건조. 한국식품과학회지, 10, 1 (1978)
4. Kim, W.J., Kim, D.H. and Oh, H.I.: Effect of solvent washing on chemical and physical properties of dried soymilk residue. *Korean J. Food Sci., Technol.*, 16, 261 (1984)
5. 김우정, 김동희 : 용매처리에 의한 두유비지의 건조방법. 특허공고번호 제 86-235, 13 (1986)
6. Kanichi, Suzuki, Asap Fujigami, Kiyoshi Kubota and Hideaki Hosaka: Drying of Okara in a vibro-fluidized bed dryer. *Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi*, 27(8), 23 (1980)
7. 김우정, 손정우, 정성수 : 용매의 洗滌회수가 건조비지의 품질에 미치는 영향. 한국식품과학회지, 17, 95 (1985)
8. Micha, Peleg and Edward, B. Bagley : *Physical properties of foods*. Marcel Dekker, Inc., p.471 (1989)
9. 〃 〃 〃, イ.ア.: 食品の電氣, 物理的 加工. 農業生産, p.4 (1988)
10. 조원일, 김도연, 김영숙, 변유량 : 된장 및 고추장의 Ohmic heating 특성. *Korean J. Food Sci., Technol.*, 26, 791 (1994)
11. Vassilis Gekas: *Transport phenomena of foods and biological materials*. CRC Press, Inc., p.80 (1992)
12. 김동훈 : 식품화학. 탐구당, p.543 (1988)
13. 李德出 : 電熱工學. 東逸出版社, p.10 (1983)
14. Polk, C. and Postow, E.: *CRC Handbook of Biological Effect of Electromagnetic Fields*. CRC Press, Inc., p.27 (1986)