Korean Chem. Eng. Res., Vol. 43, No. 6, December, 2005, pp. 696-703

여과에 의한 케이크 함수량의 한계와 효율적인 여과-압착 조작 조건에 대한 연구

임성삼† · 송연민

인하대학교 환경공학과
402-701 인천시 남구 용현동 253
(2005년 9월 6일 접수, 2005년 11월 8일 채택)

Study on the Limit of Water Content by Cake Filtration and Effective Operation in Filtration-Expression Process

Sung Sam Yim† and Yun Min Song

Department of Environmental Engineering, Inha University, 253, Yonghyun-dong, Nam-gu, Inchon 402-701, Korea
(Received 6 September 2005; accepted 8 November 2005)

요 약

케이크 여과에서 케이크에 대한 정의가 아직 마련되어 있지 않다. 특히 침전된 플럭(floc)의 여과에서는 케이크를 전혀 정의하지 못하였다. 본 연구에서는 '여과-투과(filtration-permeation)' 실험을 사용하여 모든 경우의 케이크를 명확히 정의하였다. 이 케이크의 정의에 대한 고찰을 통해 케이크 여과에 의해 이룩될 수 있는 케이크 함수량의 한계에 대한 연구를 수행하였다. 여과에 의해 형성된 케이크의 수분 함량을 줄이기 위한 압착조작(expression) 과정을 '고액분리 통합이론'으로 계산하고 실제 압착조작 데이터와 비교하였다. 여과와 압착조작 전체를 분석하여, 압착의 중요성을 검토했다. 그리고 회분식으로 조작되는 필터 프레스의 케이크 배출과 세척시간을 포함하여 가장 효율적인 조작조건을 계산하는 방법을 제안하였다.

Abstract – The definition of cake is not established for cake filtration, and especially the definition was impossible for the filtration of the floc already sedimented. The definition is proposed with the experimental method named 'filtration-permeation'. The limit of water content which can be achieved with cake filtration of floc was established with the definition of cake. The expression operation of which the purpose is to reduce the water content of pre-formed filter cake is calculated with our 'unified theory on solid-liquid separation' and compared with the experimental results. The importance of expression is analyzed by the calculated whole procedure of cake filtration and expression. The method determining the most effective operational conditions of filter press including the cake discharge and washing time is proposed.

Key words: Floc Filtration, Cake Filtration, Expression, Filter Cake, Constitutive Equation, Compressible Cake

1. 서 론

케이크 여과(cake filtration)에 관한 수많은 논문이 있으나, Yim[1]의 논문을 제외하고는 여과 케이크의 명확한 정의에 대한 논문을 찾을 수 없었다. Tiller[2]는 침전이 수반되는 여과에 대한 분석에서 여과지 위에 침전된 물질도 여과 케이크로 보았다. 본 연구에서는 먼저 매우 압축성인 케이크의 여과에 대한 실험과, Yim[1]에 의해 제안된 '고액분리 통합이론'에 의한 계산을 통해 여과 케이크의 정의(定議)를 확립하려 한다.

생물학적, 화학적 플럭(floc)과 같이 압축성이 큰 케이크를 형성하는 물질의 여과 결과 생성되는 여과 케이크의 수분 함량은 매우 높다고 일반적으로 생각되었다. 그러나 명확한 케이크의 정의가 없고, 플럭의 여과 과정에서 케이크와 플럭이 육안으로 구분되지 않으므로, 여과과정에서 얻어지는 케이크의 수분 함량을 정확히 측정할 수 있는 방법이 존재하지 않았다.

Yim은 이 난점을 해결하기 위하여 새로운 실험 방법인 '여과-투과' 방법을 개발하였다[3]. 본 연구에서는 이 '여과-투과' 실험 방법을 사용하여 새로운 케이크의 정의에 대해 실험적인 입증을 시도하고, '고액분리 통합이론'을 통해 케이크 여과에서 얻어지는 함수량을 계산하고 실험값과 비교하려 한다.

수분이 많은 여과 케이크를 피스톤이나 그 외의 방법으로 다시 압착(expression)하여 수분 함량을 낮추는 방법에 대한 이론은 Shirato 등[4]에 의해 오래전에 개발되었다. 그러나 이 이론은 압착조작이 진행되는 과정에서 물리적으로 변화하는 특성을 명확히 표현하지 못하며, 또한, 변화 과정의 이유에 대해 설명하지 못하고 있다. Yim 등[5]은 '고액분리 통합이론'을 사용하여 압착 과정에서 일

† To whom correspondence should be addressed.
E-mail: yimsungsam@inha.ac.kr

어나는 물리적인 현상을 이론적, 실험적으로 해석하였다. 본 연구에서는 이를 바탕으로 압착 압력 또는 압착시간에 따른 케이크의 수분 함량 변화를 '고액분리 통합이론'을 통하여 제시하려 한다.

현재 고액분리에 많이 사용하는 필터 프레스(filter press)나 벨트 프레스(belt press)에서 진행되는 기작(mechanism)을 흔히 케이크 여과라고 생각하고 있다. 케이크 여과 과정에서는 여과가 진행되면서 평균 비저항값이 변화하지 않으며, 이 결과 평균 공간율 또한 변화하지 않는다[6, 7]. 그러나 현재 필터 프레스에서는 수분 함량이 적은 케이크를 만들기 위해 조작 시간을 길게 한다. 이는 여과조작만을 사용하는 것이 아니고 여과 후에 압착이 일어나게 조작하는 것이고, 더구나 압착 기간이 여과에 사용된 시간보다 더 길 가능성이 있다. 또한 벨트 프레스에서는 상당히 전체 조작시간 중 많은 부분이 압착에 사용되었을 가능성이 크다. '고액분리 통합이론'을 사용하여 여과와 압착 시간의 비율에 따라 최종 생성 케이크의 수분 함량을 비교하여 봄으로써 최적의 고액분리 공정의 구성에 대한 개념을 정립하려 한다.

2. 이 론

2-1. 케이크 여과 과정에 대한 고액분리 통합이론; 여과 케이크의 최종 수분 함량

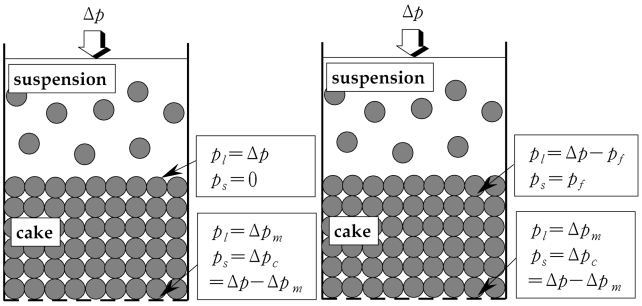
다음과 같은 순서로 고액분리 통합이론을 적용시켰다.

2-1-1. 케이크의 경계조건

Yim[1]이 제안한 '고액분리 통합이론' 이란 Darcy의 법칙이 모든 고액분리 공정에 적용 가능하다는 가정하에 새로운 경계조건을 각각의 공정에 적용하고, 이로부터 계산된 평균 비저항값을 사용하여, 고액분리 공정을 해석한 이론이다. 이 이론에서 케이크 여과에 대하여 제안한 케이크의 경계조건을 Fig. 1에 나타내었다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 여과 케이크의 새로운 경계조건은 다른 모든 여과 연구자들이 과거부터 지금까지 사용하는 여과 케이크의 경계조건과 초기 시작 부분만이 다르다. 과거의 연구자들은 현탁액과 접하는 케이크의 고체 압축 압력(p_s, solid compressive pressure)을 영(零)이라고 생각하였다. 그러나 본 연구에서는 이 값을 영이라고 생각하지 않는다.

케이크의 첫 번째 층이 유체의 흐름에 의해 받는 항력과 자신의 유체 속에서의 부력을 제외한 무게를 합한 힘을 여과 전체 면적으로 나눈 것을 '첫 번째 입자층이 다음 층에 가하는 고체 압축압력(solid compressive pressure of the first solid layer, p_f)' 이라고 정의하고 이 값이 위쪽의 경계조건이라고 가정한다. 이 개념을 설명하면 다음과 같다. 즉, 첫 번째 층이 받는 고체 압축압력인 영에서 p_f까지의 압력으로는 첫 번째 층의 공간율이 변하지 않으며, 결과적으로 첫 층의 여과 비저항값은 일정하다는 것이다.



(a) conventional concept (b) new concept

Fig. 1. Boundary conditions of a filter cake.

p_f가 매우 작은 값이므로 영을 대입할 때와 비교하여 큰 영향이 없는 것으로 생각하기 쉽다. 그러나 플럭의 여과에서 형성된 케이크와 같이 압축성을 나타내는 계수 n이 1보다 큰 매우 압축성이 큰 경우, 경계조건을 영에서 시작하여 평균 비저항값을 계산하는 경우 계산값이 음(陰, negative)의 값을 가지게 된다. 아주 작은 값이라도 p_f가 도입되면 평균 비저항값은 항상 양의 값이 된다. 또한, 고체 압축압력이 영에서 p_f까지의 두께는 플럭 입자 하나의 두께보다 매우 큰 값이 된다.

본 연구에서는 미리 침전시킨 플럭의 케이크 여과를 주로 다룬다. 이 경우 p_f는 케이크의 위에 쌓여 있는 침전물의 입자들이 케이크 입자들을 직접 물리적으로 누르는 압력이 된다. 그 크기는 수십 Pa 정도로 크지는 않으나 앞에서 언급한 바와 같이 이론적으로 중요하다.

특히 피스톤에 의한 압착 조작에서는 이 압력 p_f는 매우 큰 값까지 증가하여 압착에 대해 이론적으로 매우 중요하며, 이에 대한 분석은 다음의 압착에 대한 부분에서 다룬다.

본 실험 대상인 벤토나이트 플럭의 여과 실험과, 이 케이크의 근본식에서 계산한 p_f의 값은 36 Pa이었다.

2-1-2. 케이크의 근본식(constitutive equation)

케이크의 성질을 알기 위해 압축-투과 장치(compression-permeability cell; CPC)로 실험한 결과를 (1), (2)식에 나타내었다. CPC는 케이크에 직접적인 큰 값의 고체 압축압력(p_s)을 주어 같은 공간율을 가진 케이크를 만든 후 공간율을 측정한다. 그 후 p_s에 비해 아주 작은 액체압력으로 물을 투과시켜 측정한 투과 유속에서 케이크의 비저항값(α)를 구한다.

$$\alpha = a p_s^n \tag{1}$$

$$1 - \varepsilon = B p_s^\beta \tag{2}$$

이 식에서 ε[−]은 CPC 내에 있는 케이크의 공간율이며, α[m/kg]는 같은 공간율 ε을 가진 케이크의 비저항(specific resistance)이다. p_f는 이 케이크의 모든 부분이 받는 고체 압축압력(solid compressive pressure)이다. 여러 p_f에 대한 α를 측정하여 log-log 그래프에 그리면 대부분 직선을 나타낸다. 그 직선의 절편과 기울기에서 a와 n값을 얻는다. 같은 방법으로 공간율과 고체 압축압력에서 B와 β의 값을 구할 수 있다.

Tiller와 Shirato는 앞에서 언급한 바와 같이 p_f라는 개념을 채택하지 않고 영(零)이라고 생각하였으므로 (1)식과 (2)식을 직접 케이크 여과에 사용하지 못하였다[8]. 그 결과 새로운 근본식(Tiller[9], Shirato 등[10])을 만들어야 했다. 그러나 Yim 등[8]은 전체 압력 범위에 대하여 이 식들을 적용시켰다. 앞의 논문[8]에서 Tiller[9]가 제시한 근본식과 Shirato 등[10]이 제시한 근본식을 비교 분석하였다. 본 연구에서는 케이크 여과와 압착 실험에 우리가 제시한 근본식을 전체 범위의 고체 압축압력에 대해 적용시켰다.

본 연구의 실험 대상 물질인 벤토나이트 현탁액을 양이온 고분자 응집제로 응집시킨 화학적 플럭의 케이크에 대해 CPC를 사용하여 실험한 결과 얻은 케이크 근본식의 상수값인 a, n, B, β 값을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. The constants of the constitutive equation for the cake formed with bentonite floc

	Values
a	2.87×10^7
n	1.125
B	4.09×10^{-3}
β	0.317

2-1-3. 평균 비저항값

CPC 실험 결과인 (1)식에서 평균 비저항값을 구하는 공식은 (3)식과 같다. 이 식은 Kozeny-Carman 공식[11]에서 Ruth의 공식[12]을 만드는 과정에서 쉽게 유도하여 70년 이상 사용하고 있다.

$$\alpha_{av} = \frac{\Delta p_c}{\int_0^{\Delta p_c} \frac{dp_s}{\alpha}} \tag{3}$$

여기서 적분 범위 0과 Δp_c는 케이크의 경계조건으로 현탁액에 접하는 부분과 여과매체에 접하는 부분의 입자들이 받는 고체 압축 압력이다. 본 연구에서는 Fig. 1(b)에서 제안한 새로운 경계조건을 사용하기로 하였으므로 (3)식은 다음의 (4)식의 두 번째 항과 같이 바뀐다. 여기에 (1)식의 근본식을 대입하여 정리할 수 있다.

$$\alpha_{av} = \frac{\Delta p_c - p_f}{\int_{p_f}^{\Delta p_c} \frac{dp_s}{\alpha}} = \frac{\Delta p_c - p_f}{\int_{p_f}^{\Delta p_c} \frac{dp_s}{a p_s^n}} = \frac{a(1-n)(\Delta p_c - p_f)}{(\Delta p_c)^{1-n} - p_f^{1-n}} \tag{4}$$

a와 n은 케이크의 성질에 의한 상수이므로, (3)식과 (4)식은 Δp_c가 일정한 정압여과에서 진행시간, 케이크의 두께에 상관없이 항상 일정한 평균 비저항값 α_{av}을 가지는 것을 의미한다.

앞에서 언급한 바와 같이 n이 1보다 큰 매우 압축성이 큰 케이크는, p_f가 영인 경우에 대해 분석할 수 있다. 상수 a도 항상 영보다 크고, 압력 Δp_c도 영보다 크므로 (4)식의 제일 오른쪽 항, 즉 평균 비저항값이 음의 값을 가지게 된다. 이것은 여과에서 나타날 수 없는 현상이다. 우리의 경우와 같이 여과압력 Δp_c보다 매우 작은 p_f가 사용되면 제일 오른쪽 항의 분모가 역시 음의 값을 가지게 되어 평균 비저항값은 항상 양이 된다.

2-1-4. 평균 공간율의 계산 - 수분 함량의 계산

Tiller와 Crump[13]가 정압여과에서 케이크의 평균 공간율에 대해 유도한 식에 본 연구에서 제안한 경계조건을 대입하면 (5)식과 같이 표시될 수 있다.

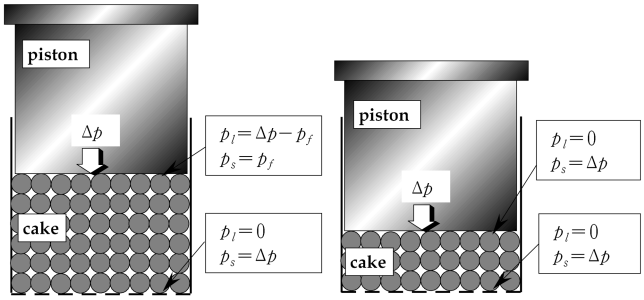
$$\varepsilon_{av} = 1 - \frac{\int_{p_f}^{\Delta p} \frac{dp_s}{\alpha}}{\int_{p_f}^{\Delta p} \frac{dp_s}{\alpha(1-\varepsilon)}} = 1 - \frac{1-n-\beta}{1-n} B \frac{\Delta p^{1-n} - p_f^{1-n}}{\Delta p^{1-n-\beta} - p_f^{1-n-\beta}} \tag{5}$$

이 식도 여과 도중 공간율은 시간에 의해 변화하지 않는다는 것을 알려주고 있다.

2-2. 압착 과정에 대한 '고액분리 통합이론'

2-2-1. 압착이론 및 경계조건

본 연구에서는 Shirato가 제시한 이론[4]과는 달리 기본적인 Darcy의 수식을 압착과정에도 적용시킬 수 있다는 가정하에, 압착이론을 새롭게 해석한 고액분리 통합이론에 의해 압착 과정을 해석하였다. 압착의 시작 순간은 여과조작이 끝날 때이며, 이때의 모식도를 Fig. 2에 경계조건과 함께 나타내었다.



(a) beginning of expression (b) end of expression

Fig. 2. Boundary conditions of expression by new concept.

본 연구에서는 압착기간 전체를 통해 피스톤 바로 아래의 입자들이 받는 고체 압축 압력 p_s는 피스톤에 의해 직접적인 압력 p_x를 받는다고 가정하였으며, 압착과정을 피스톤 바로 아래의 입자들이 받는 고체 압축 압력 p_s가 압착 초기에는 여과에서와 같은 아주 작은 압력 p_x 에서 압착과정 동안 점차 증가하여 Δp까지 받는 과정이라고 정의한다.

2-2-2. 압착기간의 평균 비저항값

평균 비저항값을 구하는 공식인 (3)식에 Fig. 2에서 제안한 압착에서의 새로운 경계조건을 대입하면, (6)식과 같다.

$$\alpha_{av} = \frac{\Delta p_c - p_x}{\int_{p_x}^{\Delta p_c} \frac{dp_s}{\alpha}} = \frac{\Delta p_c - p_x}{\int_{p_x}^{\Delta p_c} \frac{dp_s}{a p_s^n}} = \frac{a(1-n)(\Delta p_c - p_x)}{\Delta p_c^{1-n} - p_x^{1-n}} \tag{6}$$

(6)식에서 압축성 n이 1보다 큰 경우, 분자와 분모가 모두 음(−)의 값이므로 평균 비저항 α_{av}는 양(+)의 값을 가지게 된다. 이 (6)식을 눈으로 보아서는 잘 알 수 없으나, 실제 값을 넣고 계산해 보면 p_x가 증가함에 따라 α_{av}값이 점점 증가한다. 압착의 마지막 상태에서 p_x가 Δp_c에 거의 접근하면 α_{av}의 값은 압력 Δp_c에서의 α값에 수렴한다. 이에 대한 실제 계산 결과는 후에 압착실험 결과와 같이 제시될 것이다.

2-2-3. 압착과정에서 평균 공간율에 의한 p_x의 계산

압착이 진행되는 동안 케이크의 평균 공간율은 다음과 같이 정의된다.

$$\varepsilon_{av} = \frac{(\text{케이크 내의 액체 부피})}{(\text{케이크 전체의 부피})} = 1 - \frac{(\text{케이크 내의 입자 부피})}{(\text{케이크 전체의 부피})} \tag{7}$$

케이크 내의 입자의 부피는 케이크 내의 입자 질량을 입자 밀도로 나눈 것이고, 케이크 전체 부피는 압착이 진행되는 면적에 케이크 두께 L을 곱한 값이다. 이를 식으로 나타내면, 다음과 같다.

$$\varepsilon_{av} = 1 - \frac{(\text{케이크 내의 입자 질량})/(\text{입자 밀도})}{(\text{압착 면적})\ (\text{케이크 두께})} = 1 - W\frac{1}{L \cdot \rho_s} \tag{8}$$

여기서 W는 압착 단위 면적당 케이크를 이루는 고체 입자 전체의 질량(kg/m^2), L은 케이크의 두께(m), ρ_s는 고체 입자의 밀도(kg/

m^3) 이다.

Tiller와 Crump[13]가 평균 공간율에 대해 유도한 식에 본 논문의 경계조건을 적용시키면 (9)식이 된다.

$$\varepsilon_{av} = 1 - \frac{\int_{p_x}^{\Delta p} \frac{dp_s}{\alpha}}{\int_{p_x}^{\Delta p} \frac{dp_s}{\alpha(1-\varepsilon)}} = 1 - \frac{1-n-\beta}{1-n} B \frac{\Delta p^{1-n} - p_x^{1-n}}{\Delta p^{1-n-\beta} - p_x^{1-n-\beta}} \tag{9}$$

(8)식과 (9)식은 모두 평균 공간율을 나타내는 식이므로 이 두 식을 결합시키면 평균 공간율이 없어지며, 이를 케이크의 두께 L에 대해서 정리하면, (10)식이 된다.

$$L = L_0 - x = \frac{W}{\rho_s} \frac{1-n}{1-n-\beta} \frac{1}{B} \frac{\Delta p^{1-n-\beta} - p_x^{1-n-\beta}}{\Delta p^{1-n} - p_x^{1-n}} \tag{10}$$

여기서 L_0는 압착 시작할 때의 케이크의 두께이고, L은 압착 진행 시 어떤 순간의 두께이며, x는 그 순간까지 줄어든 두께이다. 이 식으로 케이크 두께 L에서의 피스톤 아랫부분의 고체 입자가 받는 고체 압축 압력 p_x가 결정된다. 압착기간에 p_x이외의 모든 값은 일정하게 유지되며, p_x만이 여과 기간의 p_f에서 압착 압력 Δp_c까지 계속 증가한다.

3. 실 험

여과 실험장치는 가압식 및 감압식을 모두 사용하였으며, 모두 일반적인 실험실 용 정압 여과장치였다. 단, 감압식의 경우 압력의 요동(fluctuation)을 막기 위해 충분한 크기의 감압용 공기탱크를 사용하였으며, 자세한 실험 장치는 Yim 등[14]의 논문에 있다.

압축-투과장치(compression-permeability cell; CPC)는 Tiller와 Crump[13]의 장치와 같은 것을 상용하였다. 압착은 여과 실험 장치를 그대로 응용하여 실험하였다.

실험 대상 물질로는 분자량 10^5인 양이온 고분자 응집제(Cyanamid Superfolc(Superfloc) C 581)로 응집시킨 벤토나이트를 사용하였다. 응집은 보통의 자테스터(jar tester)에서 130 rpm 1분의 급속교반과 60 rpm 15분의 완속교반으로 수행하였으며, 응집 후 10분간 침전시킨 후 상등액을 조심스럽게 제거하고 침전된 플럭을 사용하였다. 이 방법으로 만든 플럭은 생물학적 플럭과 달리 항상 같은 여과특성을 가지고 있었으며, 케이크의 압축성(n)이 1.125로 우리가 원하는 매우 큰 값이었다.

4. 결과 및 고찰

4-1. 케이크 여과에서 케이크와 침전물의 구분; 케이크의 정의

Bockstal 등[15]과 Tiller 등[2]은 침전물과 케이크를 구분하지 않았으며, 침전된 물질은 곧 케이크라고 생각하고 수식을 전개하였다. 본 연구에서는 침전물과 케이크를 구분하기 위해 벤토나이트 현탁액을 양이온 고분자 응집제로 응집시킨 플럭을 사용하여 케이크 여과를 수행하였다.

보통의 침전물의 여과 과정은 다음과 같다. 처음에는 침전물이 여과에 의해 점차로 케이크로 변화하며, 모든 침전물이 케이크로 변화되는 순간, 형성된 케이크의 압착이 연이어서 진행된다. 그러므로 투명한 여과 셀의 외부에서 침전물의 높이 변화를 관찰하는 것만으로는 여과과정과 압착과정을 구분하는 것이 불가능하다.

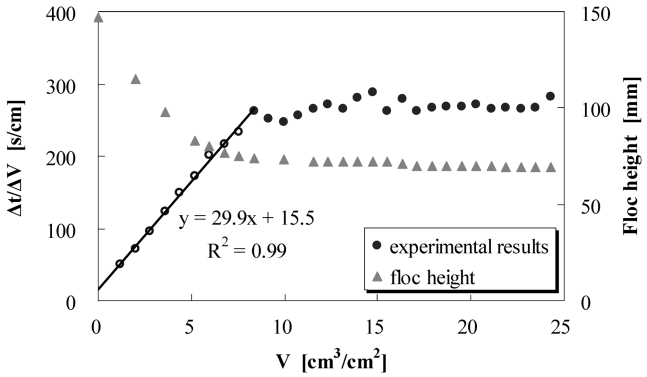


Fig. 3. Filtration-permeation of bentonite floc flocculated with cationic flocculant at 1 atm.

따라서 본 연구에서는 가압식 여과장치에서 Yim[3]에 의해 개발된 '여과-투과' 실험방법을 수행하였으며, 이 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3은 벤토나이트 현탁액을 양이온 고분자 응집제로 응집시킨 플럭을 침전시켜 상등액을 제거하고, 남은 침전물을 여과압력 1 atm에서 여과를 수행한 후, 입자 제거수를 연속적으로 여과 셀에 가해 준 결과이다. 이 방법으로 여과가 종료되는 순간부터 입자 제거 수가 형성된 케이크에 투과하게 할 수 있으며, 이 방법으로 형성된 케이크의 압착이 시작되는 것을 방지할 수 있다. 그러므로 투과기간에 일정한 높이로 유지되는 케이크의 두께를 측정할 수 있다.

Fig. 3의 여과가 시작될 때 여과 셀 속에 넣은 벤토나이트 플럭의 높이는 14.7 cm이었다. 여과 실험 동안 케이크가 형성되는 모습은 관찰되지 않았다. 이는 침전물과 케이크가 모두 불투명체이며, 시각적으로 구분되는 차이점이 없기 때문이다. 그러나 케이크의 수분 함량이 적기 때문에 침전물이 케이크로 변화하는 과정에서 침전물과 케이크의 두께를 합한 전체 높이는 감소한다. 이 감소의 과정도 그림에 삼각형으로 표시했다.

모든 침전물이 케이크로 변화한 후에는 더 이상의 높이 변화가 없어지는 것을 Fig. 3에서 볼 수 있다. 본 실험에서의 이 높이 즉, 최종 케이크의 두께는 7.2 cm이었다.

만일 Bockstal 등[15]과 Tiller 등[2]이 가정한 바와 같이 침전물이 케이크라면 이렇게 침전물의 두께가 감소하지 않고 처음부터 끝까지 같은 처음의 두께를 유지해야 한다. 또한, 그들의 이론이 옳다면 이미 형성된 케이크에 물이 투과하는 것이 되므로 Δt/ΔV vs. V의 그래프에서도 x축에 평행한 투과 상태만이 나타나야 한다. 그러나 Fig. 3에서 보는 바와 같이 Δt/ΔV vs. V가 기울기를 가지는 직선인 전형적인 여과기간이 존재함을 나타내므로 침전물과 케이크는 엄연히 구분되는 것이 실험적으로 증명된다. 이로써 우리는 침전물이 여과 케이크가 아니라는 것을 실험적으로 밝힌 것이다.

앞의 개념과 실험을 기반으로 우리는 다음과 같은 여과 케이크의 정의를 제안한다. "케이크는 단순히 여과매체 위에 침전된 물질이 아니다. 침전된 물질, 또는 현탁액에 분산되어 있던 물질이 여과매체 위에 여과 압력에 의해 재배열된 상태의 물체를 여과 케이크라 한다."

4-2. 플럭의 여과 결과 발생한 케이크의 특성; S_c

Fig. 3의 실험 결과에서 발견할 수 있는 가장 중요한 점은 여과 시작시의 침전 플럭의 높이가 14.7 cm에서 여과가 종료된 다음의 케이크의 두께가 7.2 cm로 변화했다는 사실이다. 이는 여과에 의해 평균 고형분 함량이 2배 정도 증가했음을 나타낸다. 이 실험에서 여과대상물의 고형분 분율 S는 0.023이고, 종료시에 측정된 고형분 함량 S_c는 0.045로 두 배 증가에 그친 것이다. 그러므로 Ruth의 식에서 사용되는 S/S_c의 값은 0.497이 된다.

입자현탁액의 여과실험에서 가장 흔히 사용되는 1 wt% 탄산칼슘 여과는 S/S_c의 값은 0.01 정도로 매우 작은 값이며, 다른 입자현탁액의 여과에서도 S/S_c의 값은 대략 이 정도의 값을 가진다. 그러므로 여액 단위부피당 생성되는 케이크의 질량을 계산하는 식인 $C = \rho S/(1 - S/S_c)$에서 입자현탁액 여과는 S/S_c가 분모에 있고, 그 값이 1보다 매우 작으므로 S/S_c을 생략하고 계산하는 것이 일반적이다. 그러나 플럭 여과에서는 이 값이 0.5가 되는 정도로 큰 값을 가지므로 이 값을 생략할 경우 평균 비저항값이 두 배가 틀리게 될 수도 있으므로 절대 생략해서는 안 된다. 이 S/S_c의 값의 차이가 플럭의 여과와 입자 현탁액 여과의 가장 크게 다른 점이다. 과거의 플럭 여과 결과에 대하여 이 S/S_c값을 생략한 것인지의 여부를 반드시 살펴야 한다. 과거는 케이크 두께를 결정하지 못하였으므로 S_c값의 결정이 불가능하여 S/S_c의 값을 결정하지 못한 실험이 많다.

그리고 이 실험에서 침전 플럭의 고형분 함량은 2.1 wt%, 이것의 케이크 고형분 함량은 4.3 wt%이다. 입자 현탁액의 여과에 의해 생성된 케이크의 고형분 함량은 30% 정도로 플럭 여과에 비해서는 상당히 큰 값이다. 이는 입자현탁액의 여과와 달리 플럭의 여과 결과 얻을 수 있는 케이크의 고형분 함량이 매우 작다는 것을 의미하며, 이 케이크에서 물을 더 빼어내는 다른 탈수 방법이 반드시 필요하다는 것을 알려준다. 앞으로 나올 4-4절에서는 높은 압력의 플럭 여과가 더 큰 고형분 함량을 가지는 케이크를 줄 것인가에 대한 계산을 수행한다.

4-3. 플럭 여과에서 이론에 의한 케이크 두께와 침전물의 높이 계산

앞에서 제시한 (10)식은 압착 과정에서 P_x의 값을 구하는 데 사용될 뿐 아니라, 여과 케이크의 두께를 계산하기 위해 사용할 수도 있다.

Fig. 3의 실험에서 사용한 벤토나이트의 질량이 4 g이었고, 직경 4 cm의 여과지가 사용되었으므로 최종 W값은 3.18 kg/m^{2}이다. Table 1의 a, n, B, β값을 사용할 수 있으며 여과 압력 Δp는 1기압이다. 그런데 우리는 첫 입자층이 내리누르는 압력 p_x를 직접적으로 계산할 수 없으므로, 이 식에 역으로 여과 케이크의 두께 7.2 cm를 대입하여 시행오차법으로 간단히 p_x를 계산할 수 있으며, 이 값은 3.7 Pa이었다.

밀도 2.85 g/cm^{3}인 4 g의 벤토나이트가 부력을 감안하여 직경 4 cm인 여과면적에 미치는 압력은 20.2 Pa이다. 이것은 침전물 바닥이 받는 압력으로 (10)식에서는 Δp가 되며, 침전물도 첫 입자층이 내리누르는 압력 p_x는 같게 3.7 Pa이다. 이 조건을 (10)식에 대입하면 침전물의 높이 L이 계산된다. 계산값은 14.4 cm로 실험값 14.7 cm보다 약간 작다. 이 정도의 차이는 실험오차로 생각할 수 있으나, 실제 실험에서는 벽면의 마찰로 충분한 침강이 일어나지 않아 조금 큰 값이 된다고 생각할 수 있다.

이 결과들은 우리가 제안한 p_x의 개념으로 케이크의 두께 그리고 침전물의 높이를 계산할 수 있다는 것을 증명한다. 그리고 플럭 여과에서 실험으로 구한 케이크의 두께 7.2 cm는 입자 현탁액의 케이크보다 매우 두꺼운 값이나 이론적으로도 뒷받침될 수 있는 값이라는 것을 알려준다.

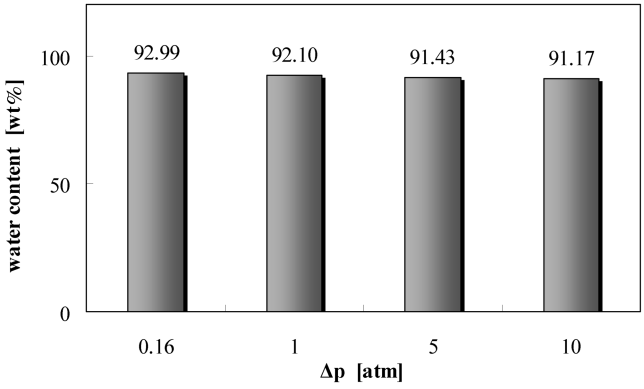


Fig. 4. Water content(wt%) of various filtration pressure in a cake (W=3.18 kg/m^2).

4-4. 여과 압력에 따른 케이크의 수분 함량 변화

통상적인 여과 압력인 1기압에서의 플럭 여과로 형성된 케이크는 수분함량이 너무 크다. 큰 수분 함량이 통상적인 여과 압력 1기압에서 기인한 것인지를 확인하기 위해, 더 높은 5기압과 10기압의 여과에서 얻어지는 케이크 수분함량을 계산하였다. 참고로 0.16기압의 낮은 압력에서의 여과에서 형성되는 케이크의 수분 함량도 계산하였다. 여과 단위 면적당 케이크의 양인 W는 3.18 kg/m^{2}이다.

(5)식의 평균 공간율에 Table 1에 주어진 케이크 근본식의 상수들을 대입한 후, 그 결과로 수분함량을 구하여 Fig. 4에 그 결과를 나타내었다.

Fig. 4의 x축은 여과 압력이며, y축은 케이크의 수분 함량(wt%)이다. 여과 압력이 가장 낮은 0.16 atm에서 케이크의 수분 함량은 92.99 wt%이었고, 여과 압력이 가장 높은 10 atm에서의 수분 함량은 91.17 wt%로 계산되었다. 이는 여과 압력을 약 63배 증가시켜도 케이크의 수분 함량의 차이는 별 차이가 없다는 의미이다. 즉 이론에 의하면 케이크 여과 조작만으로는 여과 압력을 상당한 정도 높여도 케이크의 수분 함량을 크게 낮출 수 없다.

4-5. 압착 압력과 압착 진행 정도에 따른 평균 비저항값의 변화

케이크 여과에서와 같은 케이크의 양인 W가 3.18 kg/m^{2}에서 압착 압력에 따른 평균 비저항값의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 케이크 근본식의 상수값인 Table 1을 본 연구에서의 압착 경계조건을 사용하여 평균 비저항값을 계산한 (6)식에 대입하여 이 값들을 계산하였다.

Fig. 5에서 x축은 Shirato 등[4]이 제안한 압착의 진행 정도(U_c)를 나타낸 것이다. 모든 압력에서 압착의 진행정도 U_c가 0.8일 때까지는 평균 비저항값의 변화가 크지 않다가 이 이상이 되면 평균 비저항값이 큰 폭으로 증가함을 알 수 있으며, 가해준 압착 압력의 증가에 따라 평균 비저항값에 미치는 영향은 매우 큼을 알 수 있다. 이것은 Tiller[9]가 제시한 압축성이 큰 케이크의 여과에서는 여과 평균 비저항값이 압력에 대하여 더 빨리 증가한다는 것과 유사한 현

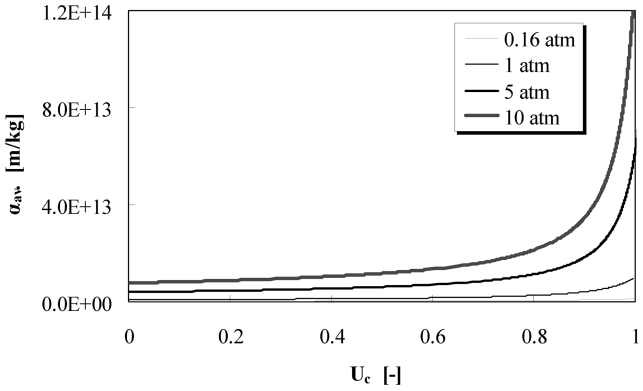


Fig. 5. Average specific resistance during expression(W=3.18 kg/m^2).

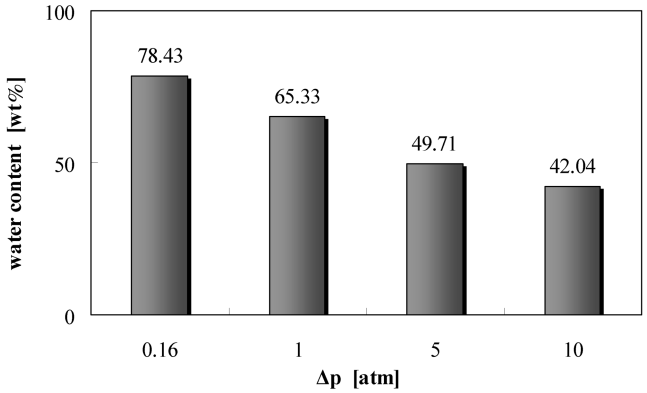


Fig. 6. Water content(wt %) of various expression pressure in a cake (W=3.18 kg/m^2).

Table 2. Average specific resistance of initial expression and final expression(W=3.18 kg/m^2)

	0.16 atm	1 atm	5 atm	10 atm
α_{av}(m/kg) (initial)	1.68×10^{11}	8.93×10^{11}	4.03×10^{12}	7.78×10^{12}
α_{av}(m/kg) (final)	1.54×10^{12}	1.21×10^{13}	7.40×10^{13}	1.61×10^{14}
ratio(–)	9.2	13.5	18.4	20.7

상이다. 그러나 Tiller와 Green[16]은 압축성이 큰 케이크의 '여과'에서는 압력을 증가시켜도 평균 공간율을 감소시키는 데는 거의 영향을 미치지 못한다고 하였으나, 압착 과정에서는 공간율도 큰 차이가 있으므로 높은 압력에서의 압착이 반드시 불리한 것만은 아니다.

위의 내용을 더 명확하게 이해하기 위해 Table 2에 여러 압력에 대해 압착이 시작될 때와 종료될 때의 평균 비저항값, 그리고 그 값의 비율을 표시하였다.

Table 2에서 가장 낮은 압착 압력 0.16 기압에 대해 살펴보면, 압착 시작시의 평균 비저항값은 1.68×10^{11} m/kg이고, 압착 종료시의 평균 비저항값은 1.54×10^{12} m/kg이었으며, 이는 압착 종료시의 평균 비저항값이 압착 시작시의 평균 비저항값보다 약 9.2배가 증가된 값이다. 반면, 가장 높은 압착 압력 10 기압에서는 압착 종료시의 평균 비저항값이 압착 시작시보다 20.7배나 증가하였다. 압착 압력이 증가할수록 압착 초기 케이크의 평균 비저항값과 압착이 종료된 시점에서의 케이크의 평균 비저항값이 모두 증가함을 알 수 있다.

4-6. 압착 압력에 따른 케이크의 최종 수분 함량 변화

앞에서와 같은 조건의 케이크 양인 W가 3.18 kg/m^{2}에 대해 압착 압력에 따른 압착 종료 후의 케이크의 수분 함량 변화를 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6을 보면, 압착 압력이 가장 낮은 0.16 atm에서의 최종 수분 함량은 78.4 wt%이며, 압착 압력이 1 atm에서는 65.3 wt%로 계산되었다. 이보다 압력이 10배 높은 10 atm에서의 최종 수분 함량은 42.0 wt%로 감소하였다.

Fig. 4의 여과에서 압력의 증가에 의한 케이크 수분 함량이 미미했던 것과 비교하면, Fig. 6의 압착에서의 압력의 증가에 의한 케이크 수분 함량의 감소 폭은 매우 큰 것이다. 그러므로 여과과정에서 큰 압력으로 여과하는 것이 필요가 없다는 과거의 개념[16]이 압착에서는 통용되지 않는다.

4-7. 케이크 여과와 압착기간 동안 걸리는 시간

플럭의 여과와 압착조작의 구분은 육안으로나 여타의 방법으로 불가능하므로 고액분리 통합이론을 사용하여 과정을 계산하였다. Fig. 7에 1기압에서 최종 W값이 3.18 kg/m^{2}인 벤토나이트 플럭과 탄산칼슘에 대해 여과와 압착을 연이어 수행한 결과를 나타내었다.

Fig. 7에서 위쪽의 선은 벤토나이트 플럭의 여과와 압착 계산 결과이며, 아래 선은 탄산칼슘의 여과와 압착 계산 결과이다. 위쪽 선의 작은 동그라미와 큰 동그라미는 벤토나이트 플럭의 여과와 압착 실험 결과이다. 처음의 가는 선은 여과과정을 나타낸 것이고 그 뒤 이어지는 굵은 선은 압착과정을 나타낸다. 실험과 이론 결과가 오차 범위 내에서 일치한다고 생각할 수 있으며, 이것은 여과와 압착 결과를 '고액분리 통합이론'으로 계산할 수 있다는 것을 의미한다.

아래쪽의 선은 탄산칼슘 입자 현탁액의 여과와 압착을 역시 고액분리 통합이론을 사용하여 계산한 결과이다. 가는 선은 여과를 나타내고, 굵은 선은 압착을 나타낸다.

압축성 계수(n)는 벤토나이트 플럭 케이크이 1.125로 매우 압축성이 큰 케이크이고, 탄산칼슘 케이크는 0.149로 압축성이 작은 케이크에 해당한다.

Fig. 7에서 보면 압축성이 큰 벤토나이트 플럭의 경우, 여과시간에 비해 압착시간이 대부분을 차지한다. 반면 압축성이 작은 탄산칼슘 현탁액은 여과시간이 매우 길고 압착 기간은 짧다. 압축성이

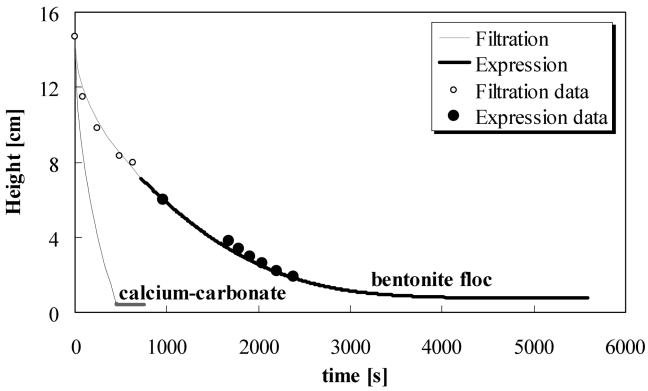


Fig. 7. Filtration and expression procedure of bentonite floc and calcium-carbonate suspension(W=3.18 kg/m^2).

작은 탄산칼슘으로 이루어진 케이크는 여과만으로도 잘 배열된 치밀한 구조의 케이크를 형성할 수 있으므로 여과를 통해서 충분한 정도의 액체가 제거되었다는 것을 의미한다. 그러므로 압착으로 인해 제거될 수분이 많지 않아 압착 기간에 케이크의 높이가 거의 변하지 않으며 압착 종료까지의 시간도 아주 짧다.

실제로 이 경우 벤토나이트 플럭의 여과시간은 709초이고 압착시간은 4874초로, 압착시간이 여과시간의 6.87배이다.

Fig. 7에서 보는 바와 같이 압축성 케이크의 압착에서는 후반부에 많은 시간이 필요하므로 위의 계산만으로는 통상적인 의미에서의 비교가 되지 않는다. 이를 살펴보기 위해 임의로 마지막 높이의 1.1배(수분 함량 67.8 wt%)에 도달하는 시간을 계산한 결과 압착시간이 3162초였으며, 이는 여과시간의 4.46배였다. 어떤 경우든지 압착에 걸리는 시간이 여과에 필요한 시간보다 몇 배 긴 것이 확실하므로 압착에 대한 시간을 여과에 계산에 포함하는 것이 반드시 필요하다.

4-8. 필터 프레스에서 경제적인 여과-압착 공정의 선정방법 제안

앞으로의 고찰을 명확히 하는데 도움을 주기 위해 몇 가지 케이크 질량에서의 압착 실험과 계산결과를 Fig. 8에 제시하였다.

Fig. 8을 살펴보면, 여과 단위 면적당 케이크의 질량 W값이 작아질수록 압착시간이 대단히 적게 걸림을 알 수 있다. 원칙적으로는 얇은 케이크를 만들수록 압착의 속도가 빨라지므로 가능한 한 얇게 만드는 것이 효율적인 압착의 비결이다. 재래식 시장에서 건강식품인 홍화씨의 기름을 기계에서 직접 짜는 것(압착)을 볼 수 있다. 이때 기름이 짜내진 나머지 고형물(케이크)이 아주 얇은 필름 형태로 연속적으로 배출되는 것을 볼 수 있다. 이론보다 기술이 먼저 개발된 좋은 예이다.

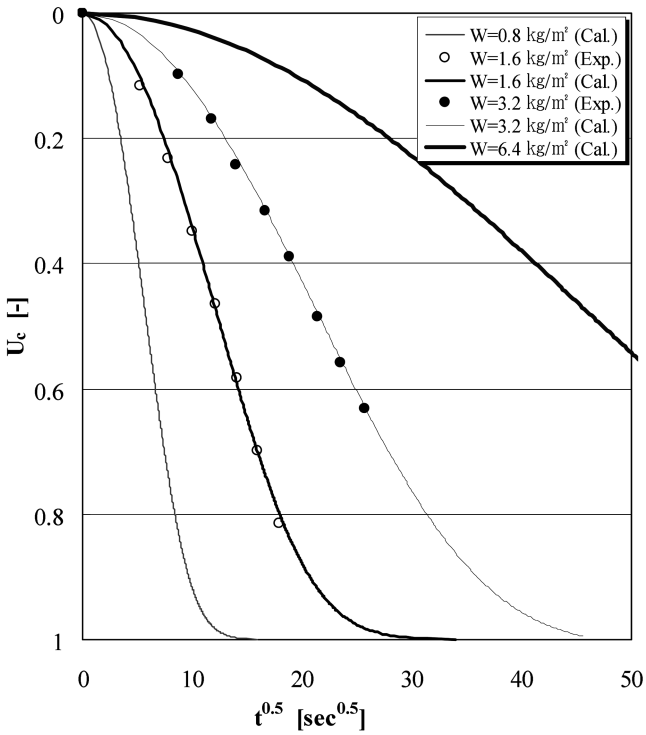


Fig. 8. Expression procedures for the various cake masses.

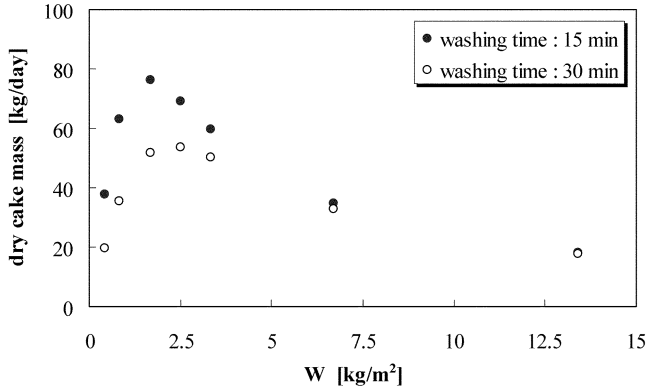


Fig. 9. Dry cake masses for filter-press operation at different washing times.

그러나 흔히 사용되는 필터 프레스(filter press)에서는 여과-압착을 거친 케이크가 내부에 가득 차게 되어 기계를 풀고 비워내야 한다. 이 시간을 고려한다면 경제적인 조작조건을 산정(算定)할 수 있다.

Fig. 9는 벤토나이트 플럭을 1기압에서 여과-압착시키는 경우 두께에 따라 면적 1 m^2인 필터 프레스로 24시간에 작업할 수 있는 고체 질량을 나타낸 것이다. 앞 절에서 설명한 바와 같이 완전한 압착 종료까지는 긴 시간이 걸리므로, 모든 계산은 앞 절과 같이 수분함량 67.8 wt%까지 압착되는 시간을 기준으로 하였다.

검은 점은 필터 프레스의 케이크 배출과 청소시간을 15분으로 계산한 것이고, 흰 점은 30분으로 계산한 것이다. 케이크의 두께가 아주 큰 경우에는 여과와 압착의 시간이 매우 길어 회분의 수가 작으므로 큰 영향을 미치지 않으나, 두께가 작은 경우에는 케이크 배출과 청소시간이 전체 처리량에 상당한 영향을 미친다.

이와 같은 계산으로 현재의 물질과 압력은 케이크 배출과 청소시간이 15분인 경우에는 W가 1.67 kg/m^2로 조작하는 경우가 같은 설비로 최대의 고액분리를 수행할 수 있다는 것을 예측할 수 있다. 그러므로 이런 경우에는 케이크가 형성되는 필터 프레스의 공간을 이에 맞도록 작게 설계하도록 함으로써 최적의 기계 설계 요건이 마련된다.

케이크 배출과 청소에 더 많은 시간이 필요한 필터 프레스는 Fig. 9에서와 같이 최적 W의 값이 변화한다.

주의할 점은 다른 압력에 대하여도 이와 같은 계산을 하여 그 압력에서의 최적 조건을 찾아야 한다는 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 화학적 플럭인 벤토나이트 플럭을 사용하여 케이크 여과, 압착실험을 수행하였고, 케이크의 근본식과 본 연구에서 제안한 새로운 경계조건을 사용하여 여과와 압착과정을 계산하였다. 이 과정에서 새로운 실험 방법인 여과-투과 실험을 통하여 케이크와 침전물의 차이를 정의하였다. 이 방법으로 실험하고, 통합이론으로 계산한 결과 압축성이 높은 물질의 수분을 케이크 여과조작만으로 공업적으로 필요한 정도까지 제거할 수 없다는 것이 밝혀졌다.

압착 압력의 증가에 따라 평균 비저항값도 증가하였으나, 반면에 케이크의 평균 공간율을 감소시켜 케이크의 수분 함량을 상당히 감소시킴을 보였다. 그러므로 압축성이 큰 케이크의 고액분리에서는

반드시 압착과정이 필요하다고 결론지었다.

그리고 고액분리를 위해 케이크 여과와 그에 이은 압착공정을 수행할 경우 효율적인 조작을 위해서는 여과기간보다 압착기간이 매우 길다는 것을 밝혔다. 또한, 회분식으로 운전되는 필터 프레스의 최적 운전 조건을 결정하는 방법을 제안하였다.

감 사

이 논문은 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었습니다(Inha-31618).

참고문헌

1. Yim, S. S., "A Theoretical and Experimental Study on Cake Filtration with Sedimentation," *Korean J. Chem. Eng.*, **16**(3), 308-315(1999).
2. Tiller, F. M. and Hsyung, N. B., "The Role of Porosity in Filtration: Filtration with Sedimentation," *AIChE J.*, **41**(5), 1153-1164 (1995).
3. Yim, S. S., Kwon, Y. D. and Kim, H. I., "Effects of Pore Size, Suspension Concentration and Pre-Sedimentation on the Measurement of Filter Medium Resistance in Cake Filtration," *Korean J. Chem. Eng.*, **18**(5), 741-749(2001).
4. Shirato, M., Murase, T. and Atsumi, K., "Simplified Equation for Constant Pressure Expression of Semisolid Materials and Filter Cakes," *World Filtration Congress II*, 39-46(1979).
5. Yim, S. S., Song, Y. M. and Lee, J. Y., "New Expression Theory Based on Darcy's Equation: Unified Theory on Solid-Liquid Separation," *HWAHAK KONGHAK*, **41**(4), 471-478(2003).
6. Tiller, F. M. and Kwon, J. H., "Role of Porosity in Filtration: XIII. Behavior of Highly Compactible Cakes," *AIChE J.*, **44**(10), 2159-2167(1998).
7. Yim, S. S. and Kim, J. H., "An Experimental and Theoretical Study on the Initial Period of Cake Filtration," *Korean J. Chem. Eng.*, **17**(4), 393-400(2000).
8. Yim, S. S., Song, Y. M. and Kwon, Y. D., "The Role of P_i, P_a and P_f in Constitutive Equation, and Boundary Condition in Cake Filtration," *Korean J. Chem. Eng.*, **20**(2), 334-342(2003).
9. Tiller, F. M., "The Role of Porosity in Filtration II: Analytical Equations for Constant Rate Filtration," *Chem. Eng. Prog.*, **51**(6), 282-290(1955).
10. Shirato, M., Kato, H., Kobayashi, K. and Sakazaki, H., "Analysis of Settling of Thick Slurries due to Consolidation," *J. Chem. Eng. Japan*, **3**(1), 98-104(1970).
11. Carman, P. C., "Fundamental Principles of Industrial Practice," *Transactions-Institution of Chemical Engineering*, 168-188(1938).
12. Ruth, B. F., Montonna, R. E. and Montillon, G. H., "Comments upon Recent Developments in Theory of Filtration," *Industrial and Engineering Chemistry*, **23**(7), 850-851(1931).
13. Tiller, F. M. and Crump, J. R., "Solid-Liquid Separation: An Overview," *CEP*, 65-75(1977).
14. Yim, S. S., Song, Y. M. and Jun, S. J., "Study on the Measurement of Average Specific Cake Resistance in Cake Filtration of Particulate Suspension and Sedimented Floc," *HWAHAK KONGHAK*, **40**(3), 330-339(2002).
15. Bockstal, F., Fouarge, L., Hermia, J. and Rahier, G., "Constant Pressure Cake Filtration with Simultaneous Sedimentation," *Filtration & Separation*, **22**, 255-257(1985).
16. Tiller, F. M. and Green, T. C., "Role of Porosity in Filtration IX Skin Effect with Highly Compressible Materials," *AIChE J.*, **19**(16), 1266-1269(1973).