

이산화탄소(CO₂) 가스에 의한 케이크 여과속도의 향상

임성삼[†] · 송연민

인하대학교 환경공학과
402-751 인천시 남구 용현동 253
(2006년 3월 6일 접수, 2006년 6월 26일 채택)

The Improvement of Cake Filtration Rate using CO₂ Gas Saturation

Sung Sam Yim[†] and Yun Min Song

Department of Environmental Engineering, Inha University, 253, Yonghyun-dong, Nam-gu, Incheon 402-751, Korea
(Received 6 March 2006; accepted 26 June 2006)

요 약

압축성이 큰 케이크에 의한 여과에서는 압력의 증가가 여과속도를 거의 향상시키지 못한다. 이 경우 높은 압력은 여과매체 옆의 케이크 공간률을 급격히 감소시켜 dense skin(치밀층, 緻密層)을 형성하여 이 층이 물의 통과속도를 매우 느리게 하기 때문이다. 실제로 압축성이 큰 케이크의 여과에서 여과속도를 향상시키기 위한 특별한 방법이 없었다. 본 연구에서는 여과 대상액을 여과조작 전에 CO₂ 가스로 포화시켜 용액에 녹아 있던 CO₂ 가스가 압력이 급격히 변하는 치밀층에서 기체 상태로 변화하여 치밀층 내에 작은 공간을 확보하고, 그 공간이 물길을 형성하여 여과속도를 향상시킬 수 있는 가능성에 대해 연구하였다.

Abstract – For the filtration of super compactible cake, the high filtration pressure can not improve filtration rate. As the high pressure, in this case, decreases the cake porosity adjacent to filter medium and thus forms 'dense skin' which decreases the rate of liquid flow in a great extent. Actually, there was no method to improve filtration rate for the filtration with super compactible cake. We propose the saturation of CO₂ gas into the suspension before the filtration operation for improving the filtration rate. The dissolved CO₂ gas transforms itself into gas phase in the dense skin through which the pressure changes dramatically. The gas secures its space inside the dense skin, and finally forms the flow passages which improve the filtration rate.

Key words: Cake Filtration, Compressible Cake Filtration, Dense Skin, Filtration with Gas Saturated Suspension

1. 서 론

케이크 여과 이론은 과거 50여 년간 많은 발전을 이루었다. 1953년 Tiller가 여과 케이크 내의 압력 분포를 계산하여 케이크 내부 현상에 대한 분석을 근간으로 하는 현대 여과 이론을 시작했다[1]. 이 케이크 내의 압력 분포를 사용하여 Tiller는 1962년 여과 케이크 내의 공간률 분포를 계산하였으며[2], 이를 기반으로 1973년에는 압축성이 매우 큰 케이크의 공간률 분포의 계산에 의거하여 dense skin(치밀층, 緻密層)이라는 개념을 제안하였다[3].

이 이론에 의하면 플럭(floc)여과와 같이 매우 압축성이 큰 케이크가 형성되는 케이크 여과의 경우 여과매체와 접하는 케이크에 공간률이 작고 물을 잘 통과시키지 않는 치밀층이 형성된다.

이러한 치밀층이 형성되는 물질은 다음과 같은 특성을 가진다[4]. 첫째, 치밀층을 치밀하지 않은 층과 구분하는 명확한 개념은 아직

존재하지 않으나, 치밀층이 케이크 전체의 5~10% 정도를 차지한다. 둘째, 여과 압력을 증가시키면 치밀층의 치밀한 정도가 증가한다. 특히 여과매체에 접촉하는 부분의 치밀도가 크게 증가한다. 셋째, 높은 압력에 의해 증가된 치밀한 부분은 물의 흐름을 느리게 하여 케이크 전체의 평균 비저항값이 대단히 증가하게 된다. 넷째, 그러므로 압력의 증가가 여과속도의 증가로 나타나지 않는다. 다섯째, 압력의 증가에 의해 영향을 받는 치밀층의 부분은 매우 얇으므로 높은 압력에 의한 여과가 함수량이 작은 케이크를 형성하지 않는다.

결론적으로 압축성이 매우 큰 케이크 여과에서는 높은 압력에서도 여과속도가 빨라지지 않으며, 케이크의 함수율도 증가되지 않는다.

보통 정도의 압축성을 가진 케이크에 의한 여과에서는 여과압력을 높이면 압력에 거의 비례하여 여과속도가 증가하며, 함수율이 적은 케이크를 얻을 수 있다. 그러나 현재까지는 플럭과 같은 압축성이 큰 물질의 여과에서 여과속도를 증진시키기 위한 유용한 방법이 제시되지 못하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 다음과 같은 가정을 통하여 실험적으로 이 분

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

야에 대해 접근을 시도하였다. 여과하고자 하는 현탁액에 CO₂ 가스를 주입하여 포화시킨 후 여과를 시작한다. 여액이 치밀층을 통과할 때 용존된 CO₂ 가스가 케이크 내의 치밀층에 형성된 큰 압력 차이에 의해 기체 상태로 전환되어 케이크를 빠져나가면서 케이크 안의 치밀층에 작은 공간을 형성시켜 물의 흐름이 빠르게 될 수 있다.

본 연구에서 이러한 현탁액에 대한 CO₂ 가스 주입에 의한 방법이 플럭의 여과와 같이 치밀층이 존재하는 압축성이 큰 케이크의 여과속도를 향상시키기 위한 새로운 방법으로 제시될 수 있는지를 확인하고자 하였다.

CO₂ 가스를 사용한 것은 질소 가스보다 3.3배 더 많은 양이 물에 녹아 감압시킬 때 더 많은 기체가 방출되기 때문이다. 그러나 여기에 사용되는 CO₂의 양은 환경에 문제될 만큼 많은 양이 아니다. 1 m³의 현탁액을 처리하기 위한 CO₂ 가스의 양은 1기압에서 23 mol로 한 사람이 하루 숨 쉴 때 배출하는 CO₂ 가스의 양인 약 33 mol보다 작다. 또한, 사용된 CO₂ 가스의 회수도 상당부분 가능하다.

압축성이 큰 케이크에서 여과속도를 향상시키기 위해 여과조제를 사용하려면, 케이크 질량만큼의 여과조제를 첨가하여야 여과 평균 비저항을 반으로 감소시킬 수 있다는 것이 오래전부터 널리 알려진 사실이다[5]. 이 경우 여과조제의 첨가로 인해 여과 대상 물질이 배로 늘어나므로 여과 평균 비저항이 반으로 감소된 것은 의미가 없다. 여과조제로 압축성이 큰 물질의 전체 여과 속도를 증가시킬 수는 없다고 결론지을 수 있다.

2. 이 론

2-1. Ruth의 공식에 의한 케이크 여과이론

케이크 여과(cake filtration)란, 여과 조제가 여과매체 표면에 형성되는 입자층인 케이크에 의해서 행해지는 여과를 말한다. 이러한 케이크 여과의 현상에 대한 분석에는 흔히 Darcy의 공식[6]이라고 불리는 (1)식을 사용한다.

$$\frac{dV}{dt} = q = \frac{\Delta p_c}{\mu \alpha_{av} W} \quad (1)$$

여기서 V는 여과 단위 면적당 여액의 부피(m³/m²)이고, t는 여과 시간(s), q는 여액의 공탈 속도(m/s), Δp_c는 케이크 양쪽 면의 압력의 차이(Pa), μ는 여액의 점도(kg/ms), α_{av}는 케이크 평균 비저항(m/kg), W는 여과 단위 면적당 케이크의 질량(kg/m²)이다. 이 식은 Darcy[6]가 발표한 형식과 완전히 동일하지는 않으나 그의 개념이 모두 포함되어 있으므로 여과에서는 흔히 Darcy의 공식이라 부른다.

이 (1)식을 여과에 적용되는 전체압력 Δp와 여과매체의 저항 R_m을 사용하여 표현하면 다음의 식 (2)가 된다.

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\Delta p}{\mu(\alpha_{av} W + R_m)} \quad (2)$$

여과가 시작되는 순간에는 여과매체 위에 케이크가 형성되지 않았으므로 (2)식에서 단위 면적당 케이크의 질량 W는 존재하지 않게 된다. 그러나 이 순간 이후에는 여과매체를 통과한 여액에 포함되어 있던 입자들이 여과매체 위에 케이크를 형성하게 된다. 따라서 단위 면적당 케이크의 질량의 단위로 물질수지를 나타내면, 현탁액 전체의 질량은 케이크의 질량과 여액의 질량이 되므로, 아래

의 관계를 얻을 수 있다.

$$W = \frac{\rho S}{1 - S/S_c} V \quad (3)$$

여기서 ρ는 여액의 밀도이고, S는 현탁액에서의 고체 질량분율, S_c는 케이크의 고체 질량분율이다. 이 식을 간단히 하기 위해 여액 단위 부피당 형성되는 케이크의 질량을 C라고 정의하면, W = CV가 되며, 아래의 식이 성립한다.

$$C = \frac{W}{V} = \frac{\rho S}{1 - S/S_c} \quad (4)$$

여과가 진행되는 동안 여액의 밀도 ρ가 변화하는 경우는 거의 없으므로 C는 현탁액의 고체 질량분율 S와 케이크의 고체 질량분율 S_c에 의해 결정된다. 이 관계를 (2)식에 대입하면 흔히 Ruth의 식이라고 부르는 (5)식이 된다.

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\Delta p}{\mu(\alpha_{av} CV + R_m)} \quad (5)$$

이 (5)식을 역으로 놓고 정리하면, 다음의 식이 된다.

$$\frac{dt}{dV} \cong \frac{\Delta t}{\Delta V} = \frac{\mu \alpha_{av} C}{\Delta p} V + \frac{\mu}{\Delta p} R_m \quad (6)$$

(6)식에 의해 여과 평균 비저항값을 다음과 같이 구한다. 여과 실험을 통하여 여과시간에 따른 여액의 부피를 정밀하게 측정하여 각 구간의 Δt /ΔV를 계산하고, 각 구간의 평균 V값을 계산하여 그래프를 그린다. 응집물 여과 또는 여과 도중 침전속도가 매우 빠른 경우가 아니면 실험결과는 대부분 직선으로 나타난다. 이를 Fig. 1에 나타내었다.

(6)식에 의하면 Fig. 1의 직선 기울기 b는 μ α_{av} C / Δp를 나타낸다. 그러므로 여과 실험에서 구한 기울기 b와 점도(μ), C 그리고 여과 압력값을 사용하여 여과 평균 비저항 α_{av}를 구할 수 있다. 여과 실험에서는 케이크 전체의 평균 비저항값만이 측정될 뿐 부분의 비저항값은 측정되지 못한다는 점을 주의해야 한다. 일정한 부분이 가지는 국지적 비저항값은 다음의 2-2절에서 논의된다. Fig. 1에 의한 여과 평균 비저항 측정 방법은 거의 80년에 걸쳐 변함없이 사용되고 있다. 그러나 Yim[7]은 여과가 진행되는 과정에서 여과 대상액에 침

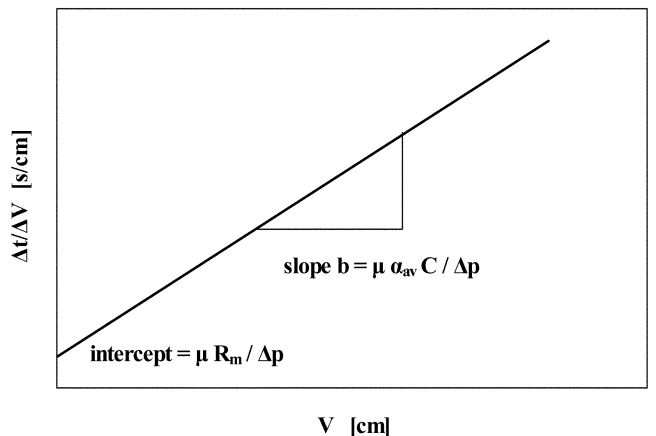


Fig. 1. Typical result of filtration experiment.

전이 일어나는 경우에는 이 방법을 사용할 수 없다는 것을 밝혔다.

(6)식의 마지막 항이 Fig. 1의 실험 결과를 외연장하여 y 축과 만나는 절편값이 된다. 즉, 절편값은 $\mu R_m / \Delta p$ 여서 여액의 점도와 여과 압력값을 사용하여 R_m 을 구할 수 있다. 이 방법 또한 80년 이상 사용되고 있으나 Yim 등[8, 9]은 이 방법에 대한 문제점을 제시하는 논문을 발표하였다.

2-2. 케이크의 기본식(constitute equation of cake)

케이크의 성질을 알기 위해 압축투과 장치(compression-permeability cell; CPC)로 실험한 결과는 (7)식과 (8)식으로 표현된다. CPC는 케이크의 입자에 직접 큰 값의 고체 압축압력(p_s)을 주어 상당한 시간이 경과한 후, 동일한 공간물을 가진 케이크를 형성시켜 이 공간물을 측정한다. 그 후 p_s 에 비해 아주 작은 액체압력으로 물을 투과시켜 측정한 투과 유속에서 케이크의 비저항값(α)을 구한다.

$$\alpha = \alpha p_s^n \quad (7)$$

$$1 - \varepsilon = B p_s^\beta \quad (8)$$

이 식에서 $\varepsilon[-]$ 은 CPC 내에 있는 케이크의 공간률이며, $\alpha[m/kg]$ 는 동일한 공간률 ε 을 가진 케이크의 비저항(specific resistance)이다. p_s 는 이 케이크를 형성하는 입자가 받는 고체 압축압력(solid compressive pressure)이다. 여러 p_s 에 대한 α 를 측정하여 log-log 그래프에 그리면 대부분 직선을 나타낸다. 그 직선의 절편과 기울기에서 이 식의 a 와 n 값을 얻는다. 같은 방법으로 공간률과 고체 압축압력의 실험에서 B 와 β 의 값을 구할 수 있다.

Tiller와 Shirato는 현탁액과 접하는 케이크 경계의 고체 압축압력(p_s , solid compressive pressure)을 영(零)이라고 생각하였으므로, 식 (7)과 (8)을 n 이 1이 넘는 매우 압축성이 큰 케이크의 평균 비저항값을 계산하기 위해 직접 사용하지 못하였다[10, 11]. 이 경우 평균 비저항값이 음의 값으로 계산되므로 이 모순을 해결하기 위해 새로운 기본식(Tiller[10], Shirato 등[11])을 만들어야 했다. 그러나 Yim 등[12]은 현탁액과 접하는 케이크의 고체 압축압력을 영이 아닌 “첫 번째 입자층이 다음 층에 가하는 고체 압축압력(solid compressive pressure of the first solid layer, p)”이라고 가정하고 전체 압력 범위에 대하여 이 식들을 적용시켰다. 이에 대한 기본식인 분석은 앞서 발표한 논문[12]에서 검토하였다.

2-3. 비압축성 케이크와 압축성 케이크

압축성은 CPC 실험결과에 의해 케이크의 성질을 나타내는 상수 값 중의 하나인 (7)식의 n 으로 정의한다. 압축성을 나타내는 n 과, 케이크가 압력에 의해 눌러 부피가 감소하는 정도는 직접 비례하지 않는다.

1950년대와 1960년대에는 주로 n 값이 0.5 이하인 케이크를 대상으로 연구하였다. Tiller와 Horn[13]은 1983년 n 의 값에 따라 압축성의 정도를 표시했고, 이 표시는 2002년에 Tiller와 Li[14]에 의해 약간 수정되었다. 그 전에는 압축성을 compressibility라고 표현하였으나, 이때에는 compactibility라고 표현하였으며, 이를 Table 1에 나타내었다.

Table 1에 나타낸 바와 같이, n 이 0이면 케이크를 구성하는 입자의 성질은 비압축성 케이크로 여과 비저항값은 압력에 무관하게 일

Table 1. Classification of cake compactibility

n	Description
$n = 0$	Incompressible
$n \approx 0.4 \sim 0.7$	Moderately compactible
$n \approx 0.7 \sim 0.8$	Highly compactible
$n > 1$	Super compactible

정하게 된다. 이는 완전한 강체 입자의 여과에서 나타나며, 여과 압력을 높여주면 (6)식에 의하여 같은 율로 여과속도가 증가한다. Tiller의 여과 실험에 주로 사용되는 대표적인 비압축성 물질로는 carbonyl iron이 있다. 이 물질의 압축성 n 값은 0.005로 측정되었다[13].

n 이 0.4에서 0.7의 범위를 가지는 중간 정도의 압축성 물질로는 kaolin flat D가 있으며, n 은 0.4이다[14].

n 이 1보다 큰 초압축성 물질로는 활성슬러지가 있으며, n 값은 1.4 정도이다[14]. 앞에서 우리가 사용한 압축성이 매우 큰 물질은 n 이 1 이상인 이 초압축성 물질을 말한다. n 이 1 이상이면 여과 비저항값이 압력을 증가시킨 만큼 증가하여 높은 압력에서도 여과속도는 증가하지 않고 계속 거의 동일한 값을 나타낸다.

이상을 요약하면, 비압축성 케이크는 여과 압력을 증가시켰을 때 여과에 걸리는 시간이 짧아지는 즉, 여과속도가 빨라지는 성질이 있다. 반면, 초압축성 케이크는 압력을 증가시켜도 여과속도가 거의 그대로인 특성이 있다.

2-4. 매우 압축성이 큰 케이크에서의 치밀층(dense skin) 현상

앞에서 언급한 바와 같이 매우 압축성이 큰 케이크에 의한 여과에서는 압력을 증가시켜도 여과속도가 빨라지지 않는다. 이는 여과 케이크 중 여과매체와 접촉하고 있는 케이크의 아주 얇은 일부분에 공간률이 작고 물을 잘 통과시키지 않는 치밀층(dense skin)이 형성된 것에서 기인된 현상이다. 이 치밀층에서 전체 압력 강하의 95~99%가 이루어지며, 이는 여과를 위해 가해진 압력의 대부분이 여기서 흡수된다는 것을 의미한다[3].

Tiller는 몇 가지의 압축성 물질에 대해 케이크 내부에서의 공간률 변화를 계산하여, 치밀층 현상을 이론적으로는 설명하였으나 실험으로는 입증된 바가 없었다. 그러나 Yim과 Ben-Aim[15]은 압축성 케이크인 응집 플러리로 여과실험을 수행한 후, 형성된 케이크를 10여 개의 얇은 층으로 나누어 공간률을 측정하여, 치밀층의 존재에 대해 실험적으로 확인한 바 있다. 즉, 현탁액과 케이크가 만나는 경계면으로부터 케이크 두께의 80%까지는 공간률이 거의 변화하지 않고, 공간률의 값도 0.97 이상으로 치밀하지 못한 상태로 계속되는 반면, 여과매체와 접하고 있는 부분의 공간률은 0.6 정도의 치밀층으로 이루어졌다는 실험적인 결과를 얻었다.

3. 실험장치 및 실험 대상 물질

3-1. 여과 실험장치

여과용기는 Fig. 2와 같이 밀봉하여 가압할 수 있게 제작하였다. 이 용기에 현탁액을 넣고 위의 마개를 닫고 밀봉한 후, 압력을 높여 여과를 시작하였다. 압력을 높이기 위한 가스통과 여과용기 사이에 빈 용기를 놓고, 입자 제거수를 채웠다. 이 빈 용기와 여과용기를 잇는 도관에도 입자 제거수를 채웠다. 압력은 입자 제거수가 들어있는 용기에 공급된다. 여과가 진행되면, 여과용기에서 여과매체를 통해

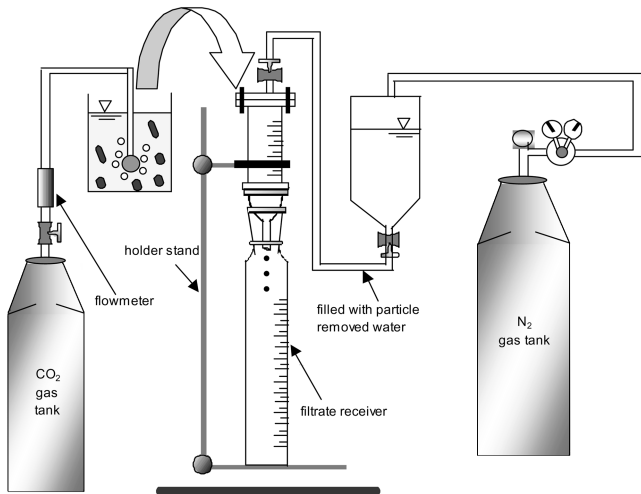


Fig. 2. Schematic diagram of pressure filtration apparatus and CO₂ gas saturation.

배출된 여액만큼의 입자 제거수가 여과 셀에 공급된다. 이 빈 용기를 장치한 원래의 이유는 높은 압력의 기체가 여과대상 현탁액에 포화되어 여과에 미치는 영향을 막기 위함이었다. 그러나 실제로는 이 장치가 여과대상 현탁액이 모두 여과되어 현탁액에 포함되어있던 모든 입자가 케이크로 변화한 후, 이 형성된 케이크에 입자 제거수가 통과하는 여과-투과 실험에 유용하게 사용되었다.

3-2. CO₂ 가스 포화를 위한 장치

CO₂ 가스를 주입하기 위해서 CO₂ 가스탱크를 마련하였고, CO₂ 가스탱크에서 jar-tester의 현탁액까지 실리콘 튜브로 연결하여 CO₂ 가스를 주입하였다. 이때 CO₂ 가스의 용해도를 높이기 위하여 실리콘 튜브 끝에 산기관을 장착하였다. 그리고 CO₂ 가스의 주입량을 조절하기 위해서 실리콘 튜브의 중간에 유량계를 설치하였다.

응집이 종료된 후, 산기관을 넣고 CO₂ 가스를 너무 격렬하지 않게 충분한 시간 공급하여 포화시켰다.

3-3. 여과매체, 시료 그리고 응집제

여과매체는 Advantec(東洋濾紙株式會社(일본)에서 제조된 Advantec Toyo 5A와 프랑스의 Sartorius사에서 제조한 공극직경 5 μm 여과막을 사용하였다.

응집물은 bentonite 입자를 현탁액으로 제조한 후 응집하여 사용하였다. 이 벤토나이트 volclay는 American Colloid Company 제품으로, 현탁액을 만든 후 coulter counter로 측정된 결과, 19.3 μm 보다 큰 것이 33.4%, 12.1 μm 보다 큰 것이 52.9%, 7.63 μm 보다 큰 것이 72.3%, 4.81 μm 보다 큰 것이 85.3%로 나타났다.

응집제로는 (주)이양화학에서 제조된 양이온 고분자 응집제 YCX-452와 양이온 응집제 Cyanamid Superfloc(Superfloc) C 581을 사용하였다. 응집제 YCX-452의 분자량은 6 × 10⁶~9 × 10⁶ g/mol로 고체상이었으며, 응집제 SC-581의 분자량은 10⁵~10⁶ g/mol로 액상(液狀)이었다. 2 L 비이커에 입자제거수를 넣고 교반을 하면서 평량한 양이온 고분자 응집제를 한 알씩 넣어가는 방법으로 응집제 YCX-452의 0.1%의 용액을 제조하였다. 완전히 다 녹인 후에 뚜껑이 달린 병에 담아 4°C 냉장고에 보관하며 실험할 때마다 꺼내어 사용하였다.

4. 결과 및 고찰

4-1. 벤토나이트 플럭의 여과실험 결과

4-1-1. CO₂ 가스를 사용한 여과와 사용하지 않은 여과의 비교

벤토나이트 4 g을 500 mL 입자제거수에 넣어 30분 동안 250 rpm으로 교반하여 현탁액을 제조하였다. 이 현탁액에 1% 양이온 고분자 응집제(SC-581) 10 mL를 첨가하여, 4분간 급속교반한 후 10분간 완속교반하여 플럭을 형성시켰다. 급속교반과 완속교반의 시간과 강도는 예비실험을 통해 결정했다. 이것을 7분간 침전시키면 침전물이 190~200 mL가 되었다. 이 침전물을 여과셀에 넣고 여과를 시작하였다.

CO₂ 가스를 포화시킬 때에는 앞에서 언급한 방법으로 CO₂ 가스를 기포로 주입하여 액에 포화시킨 후 여과실험을 수행하였다.

Fig. 3에 CO₂ 가스를 주입하지 않았을 때와 CO₂ 가스를 포화시켰을 때, 여과압력 1기압에서의 실험결과를 나타내었다.

Fig. 3의 흰색 동그라미는 CO₂ 가스가 주입되지 않은 전형적인 여과실험 결과이고, 검은색 동그라미는 여과 대상액에 CO₂ 가스를 포화시킨 후 여과실험을 수행한 결과이다. CO₂ 가스가 주입되지 않았을 때의 기울기는 25.9 s/cm²이었고, CO₂ 가스가 포화되었을 때의 여과 기울기 값은 주입되지 않았을 때의 기울기의 약 반인 11 s/cm²이었다. 이 값을 (6)식에 대입하여 여과 평균 비저항값, α_{av}를 계산한 결과, CO₂ 가스를 넣지 않은 통상적인 여과실험의 평균 비저항값은 6.56 × 10¹¹ m/kg이었고, CO₂ 가스를 포화시켜 여과 실험한 평균 비저항값은 2.72 × 10¹¹ m/kg이었다. CO₂ 가스를 포화시켰을 때의 여과 평균 비저항값이 약 1/2.4로 감소(58.5% 감소)하였다.

이는 일반적인 화학적 플럭으로 직접 여과를 수행하는 것보다 화학적 플럭에 기체를 포화시켜 여과를 수행하면 여과 비저항값이 상당히 감소하며, 결과적으로는 여과속도를 향상시킬 수 있다는 것을 의미한다.

4-1-2. CO₂ 가스 포화 압력에 따른 여과실험 결과

CO₂ 가스 포화 압력에 따른 여과속도의 변화를 알아보기 위하여, CO₂ 가스를 포화시킬 때의 압력을 0.5에서 3기압까지 변화시킨 후 1기압에서 여과 실험한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 실험 조건은 Fig. 3에서와 같으며, 단지, CO₂ 가스를 포화시킬 때의 압력만을 변화시킨 결과이다.

Fig. 4에서 검은색 동그라미는 0.5기압에서 CO₂ 가스를 포화시킨 후 1기압에서 여과를 수행한 결과이고, 검은색 세모는 1기압에서

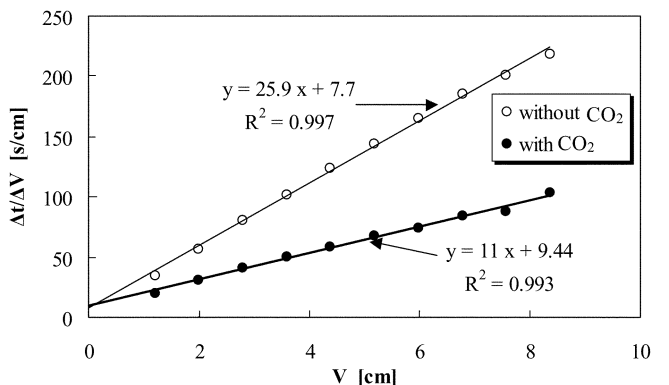


Fig. 3. Filtration results of bentonite floc with and without CO₂ at 1 atm.

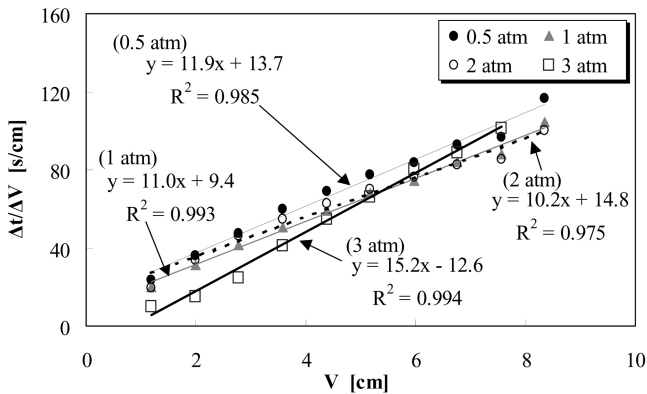


Fig. 4. Filtration experimental result of bentonite floc with CO₂ gas saturation pressure.

Table 2. The values of the slopes and α_{av} during filtration with various CO₂ gas saturation pressures

	0.5 atm	1 atm	2 atm	3 atm
Slope [s/cm ²]	11.9	11.0	10.2	15.2
α_{av} [m/kg]	3.02×10^{11}	2.79×10^{11}	2.58×10^{11}	3.85×10^{11}

CO₂ 가스를 포화시킨 후 1기압에서 여과를 수행한 결과이다. 약간의 차이는 있으나, 2배의 압력 차이에 비례해서 여과속도가 빨라지지는 않았다.

반면에 네모 모양으로 표시된 3기압에서의 CO₂ 가스 포화 후 1기압에서의 여과결과, 여과초기(여액부피가 약 30 cm³)의 여과속도는 1기압에 비해 약 2배 정도 빠르게 나타났으나, 이후에는 여과속도가 상당한 정도로 느려짐을 볼 수 있다. 케이크 두께가 작은 초기에는 높은 압력으로 포화된 CO₂ 가스가 케이크의 치밀층에 공간을 더 만드나, 약간의 시간이 지나면 오히려 많은 공간이 여과 압력을 견디지 못하고 눌러져(혹은 허물어져) 작아지며, 그 결과 여과 속도가 느려지게 된 것으로 판단한다. 이 결과가 Table 2에 평균 비저항값의 증가로 나타난다.

보다 자세한 분석을 위해 Table 2에 위의 실험에서 얻어진 기울기값과 여과 평균 비저항값을 나타내었다.

동일한 농도의 벤토나이트 플러크로 동일한 압력인 1기압에서 여과실험을 수행한 결과이나, 여과 수행 전에 CO₂ 가스 포화 압력에 따라 여과 평균 비저항값의 차이가 나타남을 볼 수 있다. 포화 압력을 0.5기압에서 4배 증가시켰을 때인 2기압에서는 여과 평균 비저항값은 약 15% 정도 감소함을 보였다. 반면에 이보다 큰 압력인 3기압에서는 오히려 평균 비저항값이 증가하였다. 이에 의하면 CO₂ 가스를 포화시키는 적절한 압력이 존재한다는 결론을 내릴 수 있다.

4.2. 탄산칼슘 현탁액의 여과실험 결과

비압축성의 대표적인 물질인 탄산칼슘의 농도 1 wt% 현탁액에 대해 1기압에서 여과실험을 수행하였다. 탄산칼슘 현탁액 20분간 교반 후, CO₂ 가스를 포화시킬 때에는 약 3분간 기포를 현탁액에 통과시킨 후 여과실험을 수행하였다. 여과압력은 1기압이며, CO₂ 가스는 1기압에서 포화시켰다. Fig. 5에 CO₂ 가스를 주입하지 않았을 때와 CO₂ 가스를 포화시켰을 때의 결과를 함께 나타내었다.

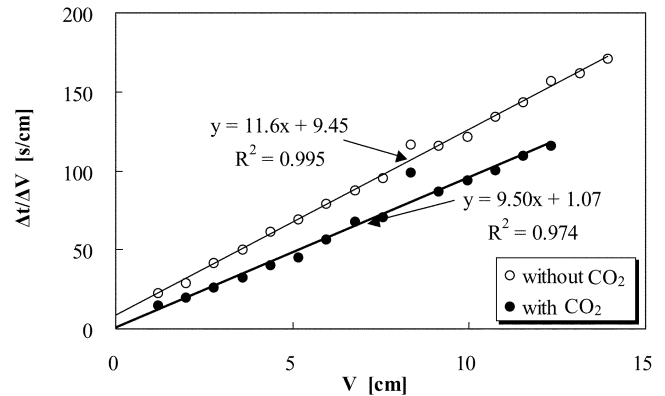


Fig. 5. Filtration of 1 wt% calcium carbonate suspension at 1 atm.

Fig. 5에서 흰색 동그라미는 CO₂ 가스 주입 없이 여과실험만을 수행한 결과이고, 검은색 동그라미는 1 wt% 탄산칼슘 현탁액을 만든 후 CO₂ 가스를 1기압에서 포화시킨 후 여과실험을 수행한 결과 값이다. CO₂ 가스를 포화시키지 않았을 경우의 기울기는 11.6 s/cm², CO₂ 가스를 포화시킨 경우의 기울기는 9.50 s/cm²이었다. 이 값을 (6)식에 대입시켜 여과 평균 비저항 α_{av} 를 계산하면 1.16×10^{12} m/kg와 9.50×10^{11} m/kg으로, CO₂ 가스를 포화시켰을 경우에는 CO₂ 가스를 사용하지 않았을 때보다 11% 감소하였다. 이는 벤토나이트 플러크의 경우 CO₂ 가스에 의해 평균 비저항값이 58.5%가 감소한 것에 비하면 많이 감소하지 않은 것이다. 4-3절에서 이에 대한 이론적인 고찰을 시도한다.

Fig. 5의 중간 부분에서 한 점씩 튀는 부분은 100 ml 눈금 실린더가 가득 차 새것으로 갈아낼 때 생긴 것으로, 새 실린더의 바닥 부분의 오차라고 생각한다.

4-3. 압축성과 비압축성 케이크의 기체포화 여과에 대한 이론적인 고찰

앞에서 압축성 케이크의 대표적인 물질인 벤토나이트 플러크와 비압축성 케이크의 대표적인 물질인 탄산칼슘 현탁액에 대해 CO₂ 가스를 사용한 여과 실험결과를 제시하였다. 본 절에서는 Tiller[10]가 제시한 방법에 본 연구에서의 기본식[12]을 적용하여, 케이크 내부의 공간률의 분포를 계산하려 한다.

먼저, 벤토나이트 현탁액을 양이온 고분자 응집제로 응집시킨 화학적 플러크의 여과에서 형성된 케이크에 대해, CPC를 사용하여 실험한 결과인 케이크 근본식의 상수값 a, n, B, β 를 Table 3에 나타내었다.

이 케이크의 n 의 값 즉, 압축성은 1.125이며, 이 값은 Table 1의 정의에 의하면 'super compactible'로 가장 압축성이 큰 케이크이다.

Table 3. The values of a, n, B, β of bentonite floc cake flocculated with anionic flocculant

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

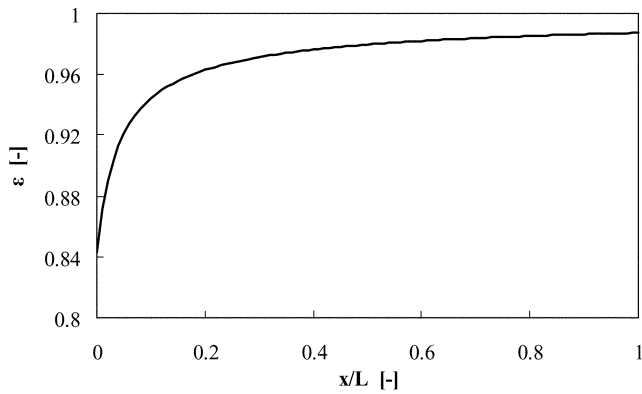


Fig. 6. Porosity distribution of the compressible cake formed with bentonite floc.

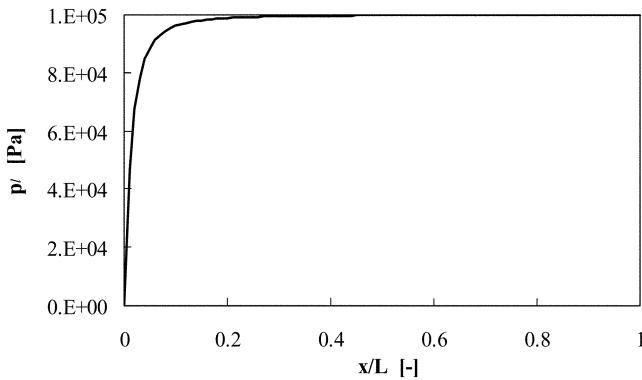


Fig. 7. Liquid pressure distribution of the compressible cake formed with bentonite floc.

Table 3에 주어진 상수값을 우리가 제안한 ‘고액분리 통합이론’에 대입하여 계산한 케이크 두께에 따른 공간률 분포와 액압 분포를 Fig. 6과 7에 나타내었다.

Fig. 6과 7에서 x축의 x/L가 0인 부분은 여과매체와 접하고 있는 케이크의 끝 부분이며, x/L가 1인 부분은 현탁액과 접하고 있는 케이크의 끝 부분이다.

관점에 따라 차이가 있을 수 있으나, Fig. 6에서 현탁액과 케이크가 만나는 경계면(x/L=1)으로부터 케이크 두께의 70%까지는 공간률이 크게 변화하지 않고, 공간률의 값도 0.98 이상으로 침전 플럭과 큰 차이가 없다. 그러나 여과매체와 접하고 있는 케이크(x/L=0)에서 근접한 부분에서는 공간률이 급격히 감소함을 알 수 있다. 명확한 경계를 정할 수는 없으나 이 공간률이 작은 부분을 Tiller와 Green[3]은 dense skin이라고 명명(命名)하였다. 우리는 이 부분을 치밀층(緻密層)이라고 이름지으려 한다. 치밀층의 존재는 위와 같은 그래프에 의해 1973년 이론적으로만 예측되었으나[3], 1984년 Yim[4]에 의해 실험적으로 그 존재가 확인되었다.

이와 같이 여과매체 부근에서 특성이 급변하는 현상은 Fig. 7의 액체 압력 분포에서 더 현저하다. 이 압축성이 매우 큰 케이크에서는 전체 케이크 두께의 대부분에서 압력의 변화가 크지 않고, 여과매체와 접하고 있는 케이크 부분인 치밀층에서는 전체 케이크 두께의 7% 이내의 부분에서 전체 압력의 93.5%가 변화한다.

벤토나이트 플럭의 여과에서 CO₂ 가스 포화시 여과속도가 빨라

지는 현상을 이 치밀층에서의 압력변화와 연관지었다. 즉, 액체에서의 포화된 CO₂ 가스를 가진 액체가 형성된 케이크를 통과할 때, 90%의 두께를 통과할 때까지는 압력의 변화가 거의 없으므로 그대로 액체에 녹아있는 상태로 유지된다. 그 후에 치밀층에서는 Fig. 7에서와 같이 압력이 급속히 낮아지므로 CO₂ 가스의 용해도가 감소하게 된다. 녹아있던 CO₂ 가스는 치밀층 내부에서 상(相)이 변화하여 기체 상태로 바뀌어 일정한 부피를 가지게 되어 실제적인 작은 공간을 만든다고 생각한다. 이렇게 형성된 공간은 물이 흐르는 길을 마련하게 되고, 이로 인하여 여과속도가 증가한다고 잠정적으로 가정하였다. 실험 도중 여과매체 아랫부분에서는 계속 공기방울이 나오는 것을 확인했다.

다음으로, 탄산칼슘 입자로 구성된 케이크에 대하여 케이크 두께에 따른 공간률 분포와 액압 분포를 계산하였다. 벤토나이트 플럭 케이크와 마찬가지로 기본식의 상수값인 a, n, B, β값이 사용된다. 이 값은 Tiller 등[16]이 제시한 값의 n, B, β값을 사용하고 본 연구에서의 기본식[12]에 대입하여 계산된 a값을 사용하였다. 이 상수값을 Table 4에 나타내었다.

Table 1에 의하면 ‘moderately compactible’ 케이크의 압축성 n이 0.4~0.7이나, 이 물질의 압축성은 0.192로 압축성이 거의 없다고 볼 수 있다.

Table 4에 나타낸 기본식의 상수값을 사용하여 탄산칼슘 입자로 구성된 케이크에 대해 공간률의 분포와 액체 압력 분포를 계산한 결과를 Fig. 8과 9에 나타내었다.

압축성이 작은 이 케이크에서의 공간률 분포 Fig. 8은 Fig. 6의 압축성이 매우 큰 케이크의 공간률 분포와는 상당히 다르다. 즉, 탄산칼슘 케이크에서는 현탁액과 접하고 있는 부분(여과 매체와 접하고 있는 부분이 아니라)에서 급격한 공간률의 감소를 보이고, 그 후에는 공간률이 거의 변화하지 않는다. 이것은 Fig. 6의 압축성이 매우 큰 케이크의 공간률 분포와는 상반되는 결과라고 할 수 있다. 여과매체와 접하고 있는 면(x/L = 0)을 기준으로 해서 생각하면, 케이크

Table 4. The values of a, n, b, β of CaCO₃ cake

	Values
a	1.55 × 10 ¹⁰
n	0.192
B	0.138
β	0.057

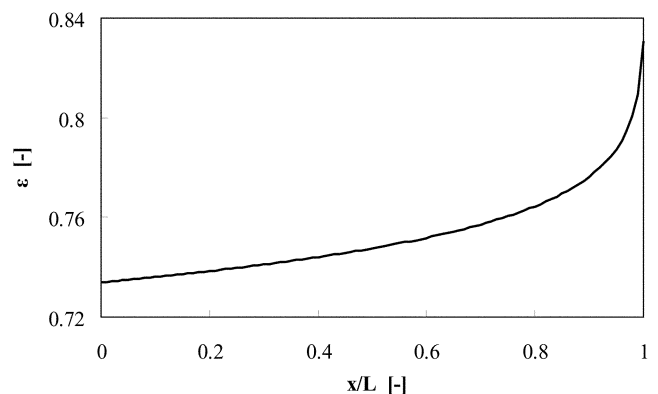


Fig. 8. Porosity distribution of the CaCO₃ cake.

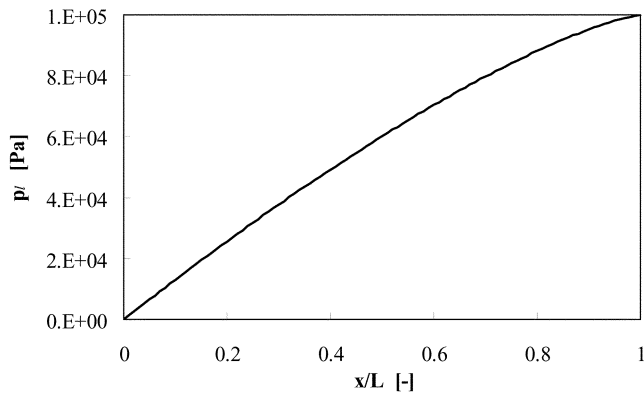


Fig. 9. Liquid Pressure distribution of the CaCO_3 cake.

크 두께의 50%부터는 케이크 내의 공간률의 변화 없이 거의 동일한 값을 가진다.

압축성이 작은 탄산칼슘 여과 케이크 내의 액압 분포를 Fig. 9에 나타내었다. 완전한 비압축성 케이크에서는 액압의 분포가 직선이 되어야 한다. Fig. 9에서의 액압의 분포는 직선은 아니나 매우 압축성이 큰 케이크 내의 액압 분포인 Fig. 7과는 매우 다른 형태를 보인다. 압력은 어느 한 부분의 x/L 에서 급격히 변하는 것이 아니라 직선 형태로 변화하므로 녹아 있던 CO_2 가스는 서서히 기체로 변화할 것이다. 이 기체가 차지하는 작은 공간들이 이어져서 물이 흐를 수 있는 길을 만들면 여과속도가 증가할 것이다. 그러나 이 작은 공간들이 서로 독립하여 존재하면 오히려 물이 흐를 수 있는 길을 막을 수도 있다. 우리가 측정 한 여과 평균 비저항은 이 두 가지 현상을 포함한 것이라고 생각한다. 앞 절에서 측정 한 바와 같이 기체를 사용하지 않은 여과 평균 비저항값 1.16×10^{12} m/kg에서 기체를 사용한 경우 9.50×10^{11} m/kg로 감소한 것은 그래도 물이 흐를 수 있는 길을 약간 열어준 결과라고 생각한다.

4.4. 소화슬러지 여과실험 결과

보통 소화슬러지의 여과 평균 비저항값은 약 $10^{13} \sim 10^{14}$ m/kg 범위이다. 따라서 소화슬러지로 직접 여과를 수행하면, 여과속도가 매우 느려 경제적인 면에서 적합하지 않다. 본 연구에서는 침전된 소화슬러지 800 mL에 0.1% 양이온 고분자 응집제(YCX-452)를 첨가하여 4분간의 급속교반과 10분간의 완속교반으로 응집을 진행한 후, 7분간 침전시켜 생성된 침전물 중 200 mL를 채취하여 여과실험을 수행하였다.

CO_2 가스 주입 여부에 따른 여과 실험결과를 Fig. 10에 나타내었다. 실험에 사용된 여과매체는 Toyo 5A이고, 여과압력은 0.5기압이다.

Fig. 10의 여과과정 직선의 기울기를 (6)식에 대입하여 계산한 여과 평균 비저항값은, CO_2 가스를 주입시키지 않았을 때 6.72×10^{11} m/kg 이었고, CO_2 가스를 포화시킨 후 여과 실험한 결과는 8.12×10^{11} m/kg 이었다. CO_2 가스로 인해 소화슬러지의 여과 평균 비저항값은 약 20% 증가하였다. 이는 앞의 벤토나이트 플럭의 여과와는 상반되는 결과로 이에 대해 다음과 같은 두 가지의 분석이 가능하다.

첫째는 응집시킨 소화슬러지는 압축성이 매우 크지 않아 치밀층이 충분히 형성되지 않았다고 가정할 수 있다. 응집 소화슬러지에 대해서는 현재 세계적으로 신뢰할만한 케이크 기본식의 계수가 CPC

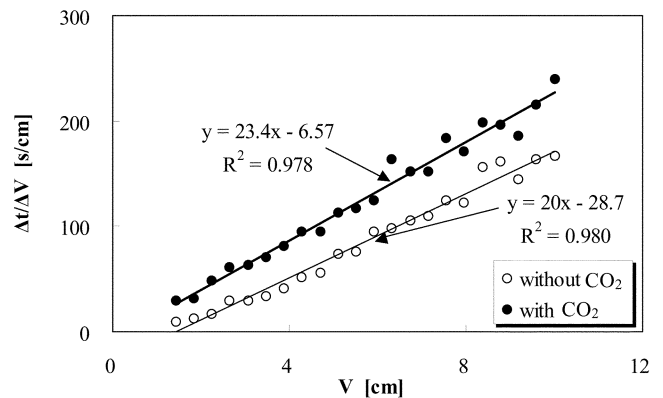


Fig. 10. Filtration result of flocculated digestion sludge with and without CO_2 at 0.5 atm.

로 측정되지 못하여 a , n , B , β 값을 알 수 없다. 대체적으로 압축성 n 의 값이 0.7을 넘는 것을 확실하다. n 이 0.7 정도면 치밀층이 충분히 형성되지 않아 기체포화의 효과를 볼 수 없으며, 중간에 조금씩 형성되는 기체 방울이 물의 흐름을 방해하여 여과 평균 비저항값을 증가시킬 가능성이 있다. 이 경우에는 적절한 응집제와 응집조건을 사용하여 치밀층이 형성될 정도로 압축성이 큰 플럭을 생성시킬 수 있다면 앞의 벤토나이트 화학적 플럭과 같이 빠른 속도로 여과시킬 수 있는 가능성이 있다.

둘째는 응집시킨 소화슬러지의 압축성은 상당히 커서 치밀층이 형성된 경우를 생각할 수 있다. 이때 소화슬러지에 존재하는 점성의 유기물질이 치밀층에 포함되어 있어 형성된 기체 방울이 밖으로 배출되는 것을 방해할 가능성이 있다. 이런 경우 역시 기체방울이 흐름을 방해하여 여과 평균 비저항값을 증가시킨다. 이 경우에는 치밀층이 형성되었으므로 그 속에서 형성된 기체방울들이 물길을 형성할 수 있는 조건, 즉, 소화슬러지의 소화조건을 조금 변경하여 유기물질을 감소시키거나 압력을 대폭 높여 형성된 기체가 밖으로 배출되며 길을 만들 수 있게 하는 조작 등을 생각해 볼 수 있다.

5. 결 론

치밀층을 형성하는 매우 압축성이 큰 케이크는 압력의 증가가 치밀층의 미소한 부분의 치밀한 정도만을 증가시킨다. 그럼에도, 불구하고 미소한 부분의 치밀한 정도가 전체 여과 평균 비저항값을 대폭 증가시켜 압력의 증가가 여과속도를 빠르게 하지 못한다. 이런 케이크의 여과속도를 증가시키기 위해, 압력의 증가분이 치밀층을 형성하는 압축성 케이크를 형성하는 화학적 벤토나이트 플럭의 여과 실험과 저압축성 케이크를 형성하는 탄산칼슘 현탁액에 대해서 CO_2 가스 주입여부에 따른 여과특성 변화실험을 수행하였다. 그 결과 화학적 벤토나이트 플럭에 CO_2 가스를 포화시켜 여과하는 경우 여과속도가 2배 이상 증가된 반면, 탄산칼슘 입자 케이크에서는 CO_2 가스의 포화에 의한 뚜렷한 여과속도의 향상을 인지 못하였다. 이 현상들을 치밀층(dense skin)의 개념을 사용하여 이론적으로 설명하였다.

참고문헌

1. Tiller, F. M., "The Role of Porosity in Filtration: Numerical

- Methods for Constant Rate and Constant Pressure Filtration Based on Kozeny's Law," *Chemical Engineering Progress*, **49**(9), 467-497(1953).
2. Tiller, F. M. and Cooper, H., "The Role of Porosity in Filtration: V. Porosity Variation in Filter Cakes," *AIChE J.*, **8**(4), 445-449 (1962).
 3. Tiller, F. M. and Green, T. C., "The Role of Porosity in Filtration: IX. Skin Effect with Highly Compressible Materials," *AIChE J.*, **19**(6), 1266-1269(1973).
 4. Yim, S. S., "Filtration Sur Gateau Compressible," Ph. D. Dissertation, L'Institut National Polytechnique de Toulouse, France(1984).
 5. Carman, P. C., "Fundamental Principles of Industrial Filtration," *Transactions - Institution of Chemical Engineers*, 168-188(1938).
 6. D'Arcy, H. P. G., "Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon," Victor Dalmont, Paris(1856).
 7. Yim, S. S., "A Theoretical and Experimental Study on Cake Filtration With Sedimentation," *Korean J. Chem. Eng.*, **16**(3), 308-315 (1999).
 8. 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).
 9. 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 Flocc," *HWAHAK KONG-HAK*, **40**(3), 330-339(2002).
 10. Tiller, F. M., "The Role of Porosity in Filtration II: Analytical Equations for Constant Rate Filtration," *Chem. Eng. Prog.*, **51**(6), 282-290(1955).
 11. 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).
 12. 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).
 13. Tiller, F. M. and Hornig, L. L., "Hydraulic Deliquoring of Compressible Filter Cakes," *AIChE J.*, **29**(2), 297-305(1983).
 14. Tiller, F. M. and Li, W., *Theory and Practice of Solid/Liquid Separation*, 4th ed., Frank M. Tiller and Wenping Li(2002).
 15. Yim, S. S. and Ben-Aim, R., "Highly Compressible Cake Filtration: Application to the Filtration of Flocculated Particles," *4th World Filtration Congress*, A1-A7(1986).
 16. Tiller, F. M., Crump, J. R. and Ville, F., "Filtration Theory in its Historical Perspective, A Revised Approach with Surprises," *2nd World Filtration Congress*, 1-13(1979).