

고지 분말 첨가에 따른 제지 슬러지의 탈수성 개선에 관한 연구

이성호[†] · 임택준 · 조준형

(2002년 4월 3일 접수; 2002년 5월 25일 채택)

Study on the Improvement of Paper Sludge Dewatering by Adding Wastepaper Powders

Sung-Ho Lee[†], Taek-Joon Lim and Jun-Hyung Cho

(Received on April 3, 2002; Accepted on May 25, 2002)

ABSTRACT

Three types of sludges including printing paper, newsprint and tissue paper were prepared at 5% concentration for filtration-expression operations. Filtration-expression characteristics of sludge were measured in different pressure and wastepaper powder dosage. Specific filtration resistance and porosity were calculated with theoretical formula.

Higher pressure increased the progresses of filtration and expression while it decreased porosity. The addition of 5% wastepaper powder more accelerated the progresses of filtration and expression than that of 10% wastepaper powder. The lowest porosity value was also measured at 5% dosage of wastepaper powder. The decrease of porosity implied the decrease of moisture content in cake.

The results indicated that dewatering of sludge was efficient in high pressure and 5% dosage of wastepaper powder.

Keywords : Dewatering, Sludge, Wastepaper, Filtration, Expression

1. 서론

펄프·제지 산업에서 배수처리중 발생하는 슬러지 및 스킴의 처리는 현장에서 매우 중요한 사안이며, 그것의 재자원화가 환경 보호뿐만 아니라 에너지 자원의

유효이용이란 관점에서도 필요하다고 생각된다.^{1,2)} 슬러지 처리 공정상에서 탈수 공정은 비용이 클 뿐만 아니라 처분방법에 있어서도 중요한 공정의 하나이다.³⁾ 폐슬러지는 일부 재활용을 제외하고는 톤당 비용을 계산하여 처리업체에 맡기고 있기 때문에 슬러지의 중량

• 본 논문은 2001년도 산학협동재단 연구비 지원에 의해 수행 되었음.

• 강원대학교 산림과학대학 제지공학과 (Dept. of Paper Science & Engineering, College of Forest Sciences, Kangwon National University, Chungchon 200-701, Korea)

† 주저자 (Corresponding author) : e-mail : jhcho@kangwon.ac.kr

및 부피 감소는 제지업체의 또 다른 숙제로 남아있다. 또한 슬러지의 장거리 수송과 장시간 저류에 의해 부패가 이루어져 탈수성이 더욱 악화되는 문제점을 갖고 있다.³⁾

상질계 고지는 주로 가정지의 원료로서 사용되었는데 근년에는 세계적인 지구환경보호, 자원절감, 원료코스트 절감 등의 관점에서 인쇄·필기용지 등 폭넓은 분야에 사용하기 시작해 이용범위가 급속히 확대되었다. 상질계 고지는 이전에는 처리가 비교적 간단하였으나 사무처리의 OA화, 인쇄잉크의 다양화 등으로 감열지, 감압지, 잉크제트 인쇄 PPC, 레이저 프린트 인쇄 CPO 등이 증가하여 그 처리에 대한 어려움이 증대되고 있다. 특히 대도시 주변의 오피스가에서 발생하는 고지가 도시 쓰레기처럼 되어 자치체의 쓰레기 비용 증가문제의 대책도 병행해 이들 오피스 고지 재이용률 증가문제의 대책이 요구되고 있다.⁴⁾ 일본 동경시에서는 하수슬러지의 부패 진행 과정을 조사한 결과 난탈수성화의 큰 요인이 화장실용 휴지에서 유래된 섬유성분의 분해 및 감소에 있는 것으로 밝혀졌다.³⁾

본 연구에서는 상질계 고지 분말을 슬러지에 첨가하여 탈수성을 비교함으로써 탈수성 증가 효과를 제시하고자 하며, 이를 통해 재활용에 문제가 되는 상질계 고지의 활용방안에 대해 검토해 보고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 재료

2.1.1 제지 슬러지

본 실험에 사용된 슬러지는 백상지를 생산하는 S제지회사, 신문지를 생산하는 D제지회사, 화장지를 생산

Table 1. SS concentration and VSS, FSS percent of paper sludge

	TSS	VSS	FSS
Printing paper	22,440	11,145 (49.7)	11,295 (50.3)
Newsprint paper	31,438	15,979 (50.8)	15,458 (49.2)
Tissue paper	23,565	4,660 (20)	18,905 (80)

TSS : Total suspended solid, mg/L

VSS : Volatile suspended solid, mg/L(%)

FSS : Fixed suspended solid, mg/L(%)

하는 Y제지회사의 슬러지를 채취하여 사용하였으며, 고형물의 유/무기물 함량을 Table 1에 나타내었다.

2.1.2 고지 분말

고지 분말은 상질계 고지(잡지 뒷장)를 수거하여, willy mill로 조분쇄한 후, ball mill로 미분쇄하여 함수율을 측정하여 기밀용기에 보관 첨가제로 준비하였다.

2.2 실험 방법

2.2.1 실험 장치

실험장치의 개요를 Fig. 1에 나타내었다. 사용한 압착여과기의 실린더 단면적은 38.49cm²이다. 실린더 내에 일정량의 슬러리를 주입한 후, 피스톤위에 하중을 가하여 슬러리를 압축시키며, 이 때 피스톤은 점차로 하강하여 어느 일정시간 경과 후, 슬러리중의 고체입자의 압밀현상에 의해 압축 평형상태에 이르게 된다. 또한, 피스톤 위에 가하여진 하중 압력에 따른 압축케이크 두께의 경시변화를 측정하기 위하여 다이얼게이지를 설치하였다.

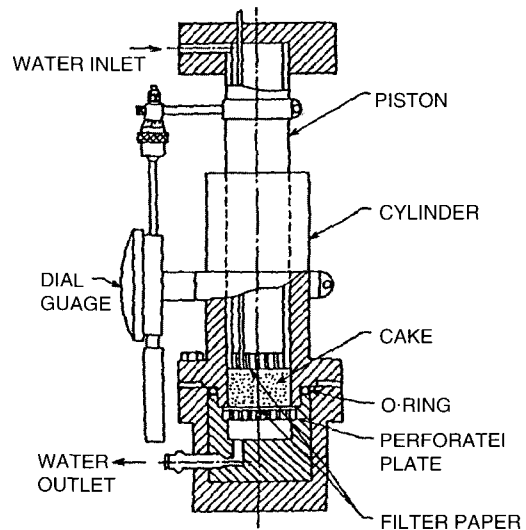


Fig. 1. Schematic diagram of expression experimental apparatus.

2.2.2 이론적 해석

케이크여과에 관한 최근의 이론적 연구는 Tiller, Shirato에 의해 압축성 여과케이크 내부에서 발생하는 Squeezing action에 의해 내부의 여액유속 및 입자이동속도분포를 고려한 근대여과이론이 제출되었다. 슬러리의 여과조작에 의한 여과기간은 슬러리의 여과 케이크를 형성하여 압밀이 시작되면 여과는 종결되어진다. 여과 기간내의 여과속도식은 Ruth의 여과 방정식을 사용하며 Eq.(1)로 나타낸다.

$$dV_f/d\theta_f = P(1-ms)/\mu\alpha_{av}\rho_s(V_f+V_m) \quad (1)$$

정압하에서의 여과액 체적 V_f 와 여과시간 θ 의 관계는 Eq. (1)을 적분하고 정압여과계수 K 를 사용하여 Eq. (2)로 표현되어 질 수 있다.

$$(V_f + V_m)^2 = K(\theta_f + \theta_m) \quad (2)$$

여과액 체적 V_f 대신에 정압하에서의 혼합물 두께 L 을 사용하여 Eq. (2)를 다르게 표현할 수 있다.

$$(L_0 - L) + L_m = i\{K(\theta_f + \theta_m)\}^{1/2} \quad (3)$$

여기서, L_0 는 혼합물의 초기두께이고, i 는 배수면의 수이며, L_m 은 여재 저항을 고려한 여과액 체적 iV_m 과 같다. (3) 식으로부터

$$(U_f + U_m) = (T_f + T_m)^{1/2} \quad (4)$$

따라서,

$$U_f \equiv (L_0-L)/(L_c-L_m), \quad U_m \equiv L_m/(L_0-L_m), \\ T_f \equiv K_w\theta_f i^2/\omega_0^2$$

윗식을 이용하여 여과계수 K_w 를 다음과 같은 간단한 형태로 나타낼 수 있다.

$$K_w = \{2P\rho_s/\mu\alpha_{av}\rho_s(1-ms)\} \quad (5)$$

위의 식에서 s 는 혼합물의 농도, μ 는 여액 점도, α_{av} 는 평균 여과비저항, ρ_s 는 고체입자의 밀도이다. 그리고 여재저항을 고려한 여과시간 $\theta_m = \omega_0^2 U_m^2 / i^2 K_w$ 의 관계를 사용하여 U_f 를 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_f = [i(k_w)^{1/2}\{(\theta_f + \theta_m)^{1/2} - (\theta_m)^{1/2}\}]/\omega_0 \quad (6)$$

여기서 U_f 는 여과기간에서의 진행정도를 나타낸 것이며, 여과기간이 시작되는 시점에서는 $U_f = 0$ 이며, 종료시점에서는 $U_f = 1$ 이 된다.

일정질량의 농축한 슬러리를 압착장치에 공급하여, 일정하중을 가하여 압착시키면, 슬러리원료는 먼저, 여과와 동일한 구조상태로 분리되어 여재위에 케이크가 형성된다. 공급슬러리가 전부 여과되어 여실내부상태가 생성케이크로 이루어지면 그 이후는 케이크 내부의 공극부로부터 액체가 착액되어 장시간 후에는 압축 평형 상태에 도달하게 된다. 케이크의 형성이 진행되면서 Eq. (5)에 정의된 L_c 점까지 두께 L 이 감소하게 되면 여과기간은 끝이 나게 되고, 앞으로는 압밀이론이 적용되는 압착이 시작되어진다. 압밀기간이 진행되는 동안, 압축된 케이크 안의 수력학적 압력은 계속 감소하는데 반해, 정압하에서의 여과 케이크는 실질적으로 일정하게 유지되어지기 때문에 압밀에 의한 탈수와 여과에 의한 탈수는 서로 구별되어 진다. 압축케이크 안의 수력학적 압력 $P_c=0$ 이 된다 하더라도 두께는 조금씩 감소하게 되는데 이는 케이크 내에서 2차 압밀이 발생되기 때문이다.

수정 압밀계수 C_e 는 압밀속도를 지배하는 중요한 조작 변수이다. Fitting법은 실측치 U_c vs. θ_c 곡선이 이론곡선

$$U_c = 1 - \exp(-\pi^2 i^2 C_e \theta_c / 4 \omega_0^2) \quad (7)$$

과 근사하다고 가정하고 수정압밀계수를 결정하는 방법이다. 이론치 $U_c = 0.9$ 가 되는 점 C' 와 $U_c = 0$ 에서의 접선 기울기비가 1.08이 되는 사실로부터 L_c-L_0 vs. $\theta^{1/2}$ 의 Plot에서 접선에 대해 1.08배에 해당하는 선을 작성한다. 교차되는 점에서 θ_{c90} 을 구하고 다음식에 의해 C_e 를 구한다.

$$C_e = 0.933\omega_0/i^2\theta_{c90} \quad (8)$$

2.2.3 실험 방법

백상지, 신문지, 화장지 슬러지를 각각 5%의 슬러리로 조제하여 여과압착 실험장치에 주입하여 실험을 행하였다. 98kPa와 196kPa의 압력변화를 주어 압력 변화에 따른 여과압착 특성을 측정하였으며, 5%, 10%의 고지 분말 첨가량의 변화에 따른 여과 압착특성을 측정하였다.

여과압착 실험에 의해 생성된 여과 케이크를 건조기에 24~48시간 동안 건조시켜 습윤 케이크/건조 케이크의 습건 질량비를 구하였으며, 이론식에 의해 공극율과 여과비 저항을 측정하였다.^{5,6,7)}

슬러리의 여과진행도(U_f)와 압착진행도(U_c)를 그림으로 도해하여 여과, 압착 특성을 나타내었으며, 실험에서 얻은 data를 여과압착이론에 의한 분석을 통해 고지 첨가량에 따른 슬러리의 탈수성을 측정하였다.^{6,7,8)}

3. 결과 및 고찰

슬러리 및 여과 케이크 두께의 시간에 대한 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 이 그림은 여과가 진행되는 모습을 도식적으로 표현한 것으로 여과기간의 종료시간 및 그때의 시료 두께 L_f 를 L 와 θ 의 관계로부터 구할 수 있다.

그리고 보다 정확한 L_f 점을 구하기 위해 케이크 두께의 차이를 시간에 대한 미분값으로 표현한 $-dL/d(\theta)^{1/2}$ 과 θ 의 관계를 Fig. 3에 나타내었다.^{5,8,9,10)}

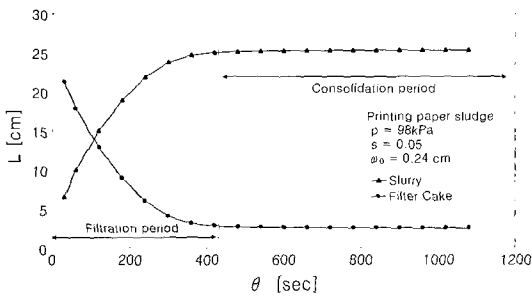


Fig. 2. Thickness of mixture L vs. expression time θ .

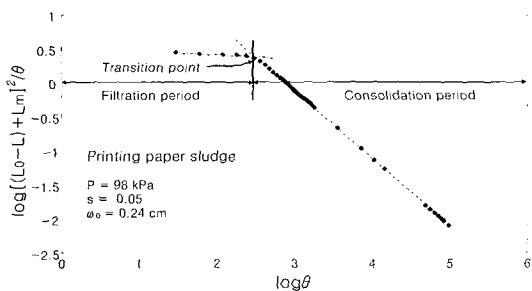


Fig. 3. Determination of transition point.

Fig. 3에서 보는 바와 같이 여과기간 중은 Ruth의 여과속도 식에 따라 수평직선을 나타내고 있으나 압밀기간에 들어서면 Ruth의 여과속도식이 적용, 성립되지 않으므로 $-dL/d(\theta)^{1/2}$ 의 값은 급격히 감소한다. 그러므로 여과기간에서 압밀기간으로 이행하는 L_f 점을 보다 정확히 측정할 수 있다.^{5,9,10,11)}

Fig. 4, 5는 백상지 슬러지와 신문지 슬러지 그리고 화장지 슬러지에서의 U_f 와 $i[(\theta_f - \theta_m)^{1/2} - \theta_m^{1/2}] / \omega_0$ 의 관계를 압력의 변화와 고지분말 주입량의 변화에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 실선으로 표시된 것은 Fitting method에 의해 Eq (6)을 이용하여 작성한 것이며, 점선들은 실험적인 수치를 나타낸다. 여과기간의 진행 정도를 나타내는 여과비 U_f 는 여과가 시작되는 처음 점

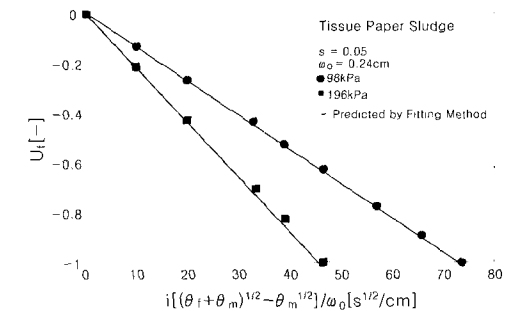
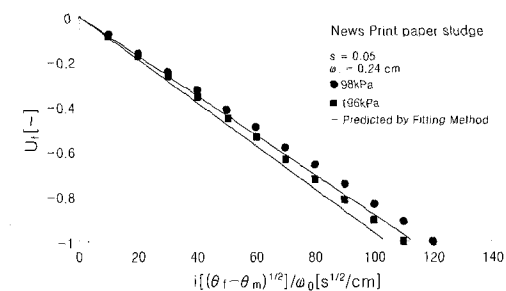
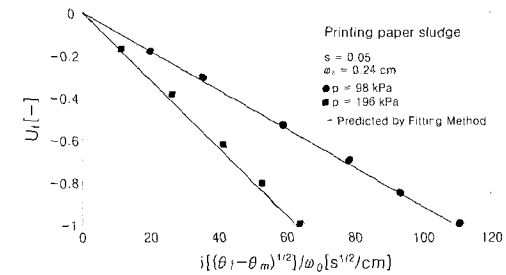


Fig. 4. Relation between U_f and $i[(\theta_f - \theta_m)^{1/2} - \theta_m^{1/2}] / \omega_0$, in each pressure.

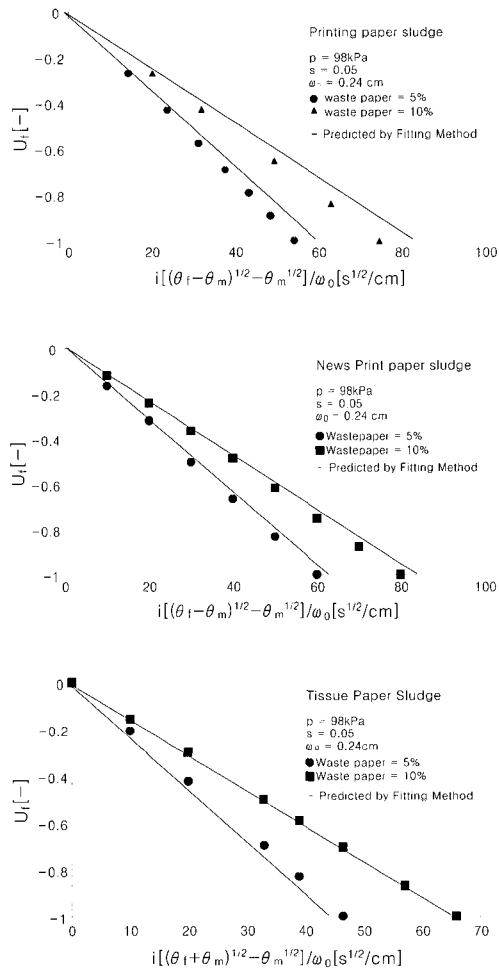


Fig. 5. Relation between U_r and $i[(\theta_r - \theta_m)^{1/2} - \theta_m^{1/2}]/\omega_0$ in each dosage of wastepaper powders.

에서는 0의 값을 가지며, 여과가 계속 진행하면서 점차적으로 증가한다. 정압여과기간에서 여과저항이 무시 가능하면, 여과비 U_r 또는 시료두께의 감소량 $(L_0 - L)$ 은 $i[(\theta_r - \theta_m)^{1/2} - \theta_m^{1/2}]/\omega_0$ 에 대해서 직선적으로 증가한다.¹²⁾ 그리고 U_r 에 도달하기까지의 시간 θ_r 는 기타의 조건이 동일하다면, 단위면적당 고형분 질량인 ω_0 의 제공에 비례한다.^{5,9,10,13)} 그림에서 알 수 있듯이 압력이 증가함에 따라 여과종료가 빨리 이뤄짐을 알 수 있다. 또한 일정한 압력으로 5% 고지분말을 첨가하였을 경우가, 아무 것도 첨가하지 않은 경우에 비해 더 빠른 여과진행도를 나타내고 있다.

Fig. 6, 7은 백상지, 신문지, 화장지 슬러지의 압력

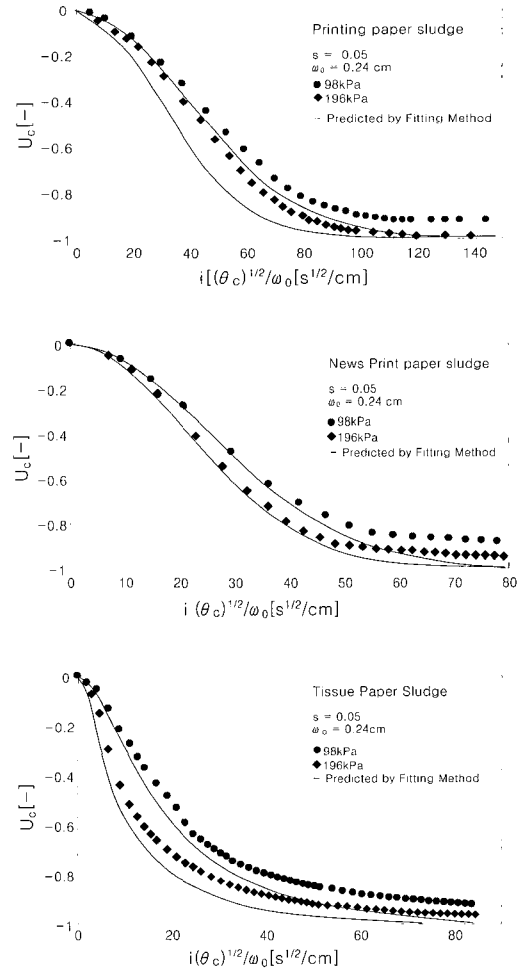


Fig. 6. Relation between U_c and $i(\theta_c)^{1/2}/\omega_0$ in each pressure.

과 농도를 변화시켜 구한 압밀비 U_c 를 $i(\theta_c)^{1/2}/\omega_0$ 에 대해 표시한 것이다. 그림에서 실선은 Fitting method에 의해 결정된 수정압밀계수 C_c 값을 이용한 수치이다. 그림에서 알 수 있듯이 압력이 클수록 압밀비가 증가하며, 고지 분말 5%를 첨가하였을 때 가장 우수한 압밀비를 나타내고 있다.

Fig. 8, 9는 백상지 슬러지에서 평균여과비저항 α_{av} 와 압력, 고지 주입량 변화의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 압력이 증가할수록 여과비저항은 커지고 고지 주입량이 5%일 때 가장 높은 여과비저항을 나타내고 있다. 신문지 슬러지와 화장지 슬러지도 이와 유사한 경향을 나타내었다.

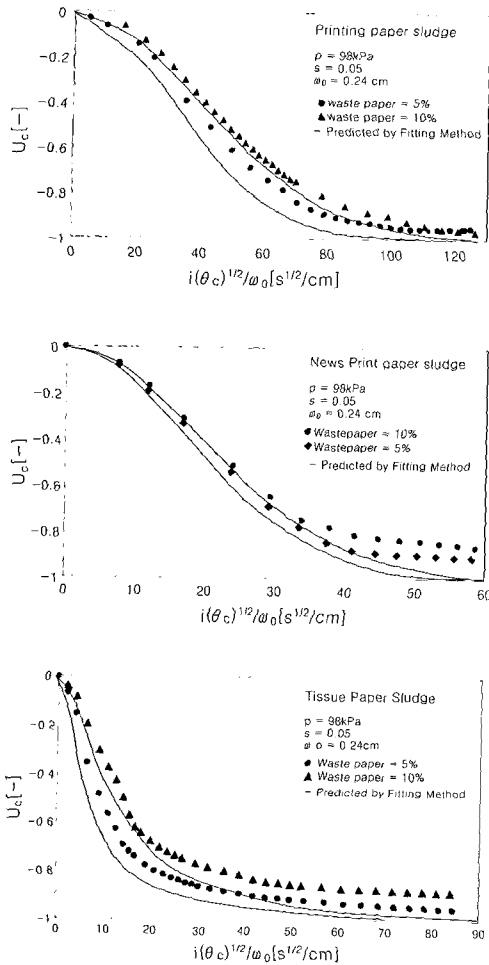


Fig. 7. Relation between U_c and $i(\theta_c)^{1/2}/\omega_0$ in each dosage of wastepaper powders.

Fig. 10은 압착압력 변화에 따른 ϵ_{av} 와 $i(\theta_c)^{1/2}/\omega_0$ 의 관계, Fig. 11은 고지 주입량에 따른 ϵ_{av} 와 $i(\theta_c)^{1/2}/\omega_0$ 의 관계를 나타낸 것이다. 그림으로부터 알 수 있듯이 초기 상태의 압밀 기간에서는 케이크 내의 평균 공극률 값은 점차로 감소하나, 압밀 평형상태에 이르게 되면 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 공극률이 감소한다는 것은 케이크 내부에 존재하던 수분이 빠져나간다는 것을 의미하므로, 공극률과 함수율은 서로 비례관계에 있다고 볼 수 있다.^{7,8,9} 98kPa보다 196kPa의 압력에서 더 낮은 함수율을 나타내고 있으며, 5%의 주입량에서 가장 낮은 함수율을 나타내고 있다.

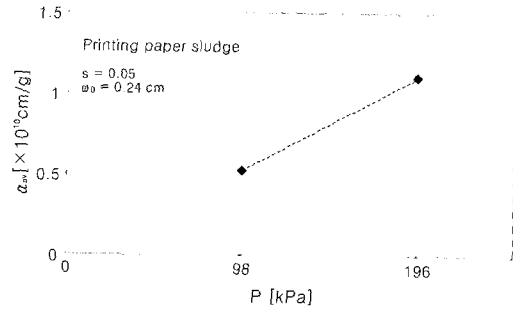


Fig. 8. Relation between α_{av} and pressure of printing paper sludge.

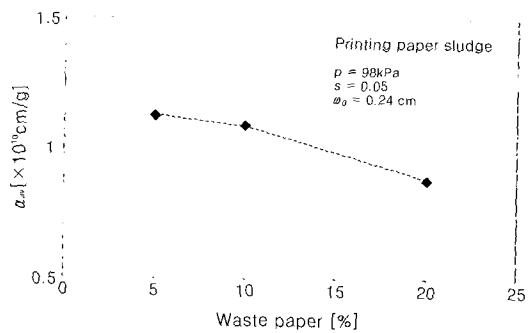


Fig. 9. Relation between α_{av} and dosage of wastepaper powders.

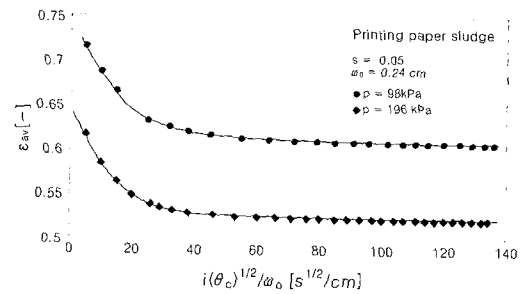


Fig. 10. Relation between ϵ_{av} and $i(\theta_c)^{1/2}/\omega_0$ in each pressure.

4. 결론

백상지, 신문지, 화장지 슬러지를 압력변화 및 고지 분말의 첨가 농도에 변화를 주어 여과압착 실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

백상지, 신문지, 화장지 슬러지 모두 압력이 증가함에 따라 여과진행도 및 압착 진행도가 증가하였고, 평

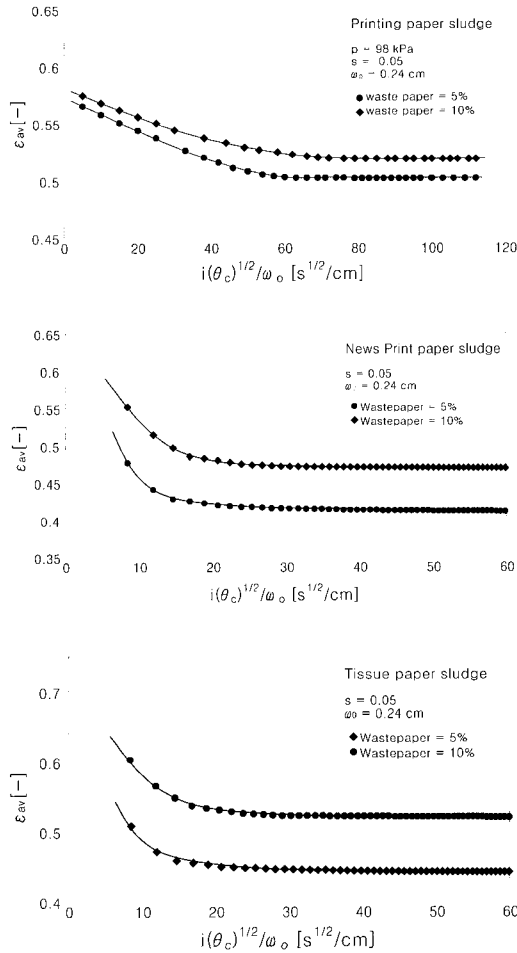


Fig. 11. Relation between ϵ_{av} and $\theta_c^{1/2}/\omega_0$ in each dosage of wastepaper powders.

균여과비 저항도 증가하였다. 또한 공극률은 압력이 증가함에 따라 감소하여, 탈수성이 증가되었다는 것을 나타내었다. 고지 분말 제조 비용은 실험실적으로 소량을 제조하였기에 정확히 산출할 수는 없지만 슬러지의 톤당 처리비용이 전체 처리공정의 30~50%를 차지하는 실정에서 함수율의 감소는 바로 처리비용과 직결하기 때문에 7~10%의 함수율이 감소된다면(일본 동경시에서 실증플랜트 운영 결과 함수율 8% 감소)³⁾ 고지 분말 제조 비용은 무의미할 정도일 것이다.

고지분말 첨가량을 슬러지 고형물의 5% 첨가하였을 때 여과진행도 및 압착진행도가 가장 빠르게 나타났으며, 평균여과비 저항이 높게 나타났다. 또한 공극률이

고지분말을 5% 첨가했을 때 더 감소하여, 그만큼 탈수성이 향상되는 것을 나타내었다. 이와 같은 결과는 활성 슬러지에 고지 분말이 첨가되어 수분이 빠져나갈 수 있는 통로를 마련하여 얻어진 것으로 사료된다. 또한 5% 이상으로 과잉 첨가시에는 오히려 역효과를 나타내지 않았나 사료되며, 이에 대한 정밀한 메커니즘은 아직 밝혀진 바가 없다. 이와 같은 결과를 통해 고지분말을 슬러지의 고형분에 대해 5% 첨가하였을 때 탈수성이 증가되는 것을 알 수 있었으며, 또한 상질계 고지를 이용하여 이와 같은 결과를 얻었으므로 상질계 고지의 재활용에 대한 가능성을 제시할 수 있었다.

인용 문헌

1. 조준형, 펄프·종이폐수처리기술, 강원대학교 출판부, 9~13p (2000).
2. R. S. Ramalho, Introduction to Wastewater Treatment Processes Second Edition, Academic Press (1983).
3. 편집부, 고지첨가에 의한 슬러지 탈수 시스템, 첨단환경기술, 14p (2000).
4. 편집부, 잡지고지의 탈수에 관하여, 제지계 7월호, 37p (2000).
5. M. Shirato, T. Murase, M. Iwata, Theoretical and Experimental studies in Expression, Memoirs of the Faculty of Engineering, Nagoya University, Vol 38, No. 1, May, 42~85p (1996).
6. 조준형, 여과케이크의 압착탈수조작에 관한 연구, 목재공학 Vol. 18, No. 1, 3~9p (1990).
7. 조준형, 박용준, 충전제 Kaolin의 여과압착 특성에 관한 연구, 강원대학교 과학기술연구 Vol. 31, 231~237p (1992).
8. Tiller F. M. and H. R. Cooper, AIChE Journal, 595p (1960).
9. Idem, Filtration and Separation, 277p (1970)
10. M. Shirato, T. Murase, M. Negawa, H. Moridera, J. Chem. Eng. Japan (1971).
11. M. Shirato, T. Murase, H. Kato, S. Fukaya, Kagaku, Kogaku (1967).
12. J. H. Perry, Chemical Engineers Handbook, 4th ed., 19~39, McGraw-Hill, New York (1963).
13. Koo, E. C., Ind. Eng. Chem. 342p (1942).