

광학센서를 이용한 지료의 농도 평가 기술 개발 (제1보)

- 펄프 슬러리 및 충전물 농도와 탁도 및 투과율의 상관관계 분석 -

이학래 · 이지영 · 윤혜정[†]

(2005년 10월 5일 접수: 2006년 2월 20일 채택)

Development of On-line Technology for Measuring Stock Consistency Using Optical Sensor (Part 1)

- A study on the relationship between the turbidity and transmittance
of stocks and their consistency -

Hak Lae Lee, Ji Young Lee, and Hye Jung Youn[†]

(Received on October 5, 2005: Accepted on February 20, 2006)

ABSTRACT

To develop an efficient and cost effective on-line method to determine the stock consistency a study on the relationship between the turbidity and transmittance of stocks and their consistency was carried out using a system consisted of a dynamic drainage jar, pump and turbidometer. Results showed that the wavelength of 525 nm was most effective for measuring turbidity. As the consistency increases the turbidity increases, and their relationship can be depicted in the second order equations. On the other hand the relationship between consistency and transmittance can be described in exponential equations. From these equations the consistencies of stock samples can be determined using the measured values of turbidity or transmittance.

Keywords : on-line measurement, consistency, turbidity, transmittance, optical sensor, pulp slurry, filler

• 서울대학교 농업생명과학대학 산림과학부 (Dept. of Forest Sciences, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul, 151-921, Korea)

† 주저자(Corresponding Author) :E-mail: page94@snu.ac.kr

1. 서론

일반적으로 초지공정에서 농도와 보류도는 초지기에서 채취한 샘플을 실험실에서 측정하였으나¹⁾ 현재 진행되고 있는 고속화 및 광폭화의 초지시스템에서는 이러한 방법으로는 효율적인 공정 컨트롤이 이루어질 수 없다. 현실적이고 효과적인 제지공정의 wet end 제어를 위해서는 농도와 보류도를 실시간의 연속적인 측정이 필요하지만 국내의 제지산업에서는 연속적인 농도 평가가 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 온라인 상에서의 자동적인 농도 측정은 전단력을 측정하거나 광학적 방법 또는 방사선을 이용한 방법 등을 채택한 설비를 통해 이루어지고 있지만, 설비에 따라 정확도의 차이가 크며, 가격 또한 그에 상응하여 변화된다.²⁾ 특히 wet end 컨트롤 목적으로 사용하기 위해서는 매우 높은 정확성이 요구된다. 국내에서 wet end 컨트롤 목적으로 사용되고 있는 온라인 농도 측정기³⁾는 대부분 외국에서 수입되어 가격이 비싸고 효율적인 관리가 이루어지지 못하는 경우가 많다. 따라서 국내 제지산업의 환경에 부합하면서 저렴하고 간편하면서도 신뢰성이 높은 농도 측정 기술 개발이 필요하다 하겠다.

최근 진행되고 있는 wet end의 새로운 제어 시스템의 특징을 살펴보면 보류도를 평가하기 위하여 백수의 농도를 실시간으로 측정한다. 백수 농도의 증감은 보류도를 나타내는 직접적인 지표이기 때문에 보류도를 측정함에 있어 백수의 농도를 정확하면서도 신속히 측정하는 것이 가장 중요하다. 하지만 일반적으로 제지공정에서는 장섬유, 미세섬유 및 충전제 등 다양한 원료가 투입되기 때문에 지로나 백수의 농도를 실시간으로 측정하는데 많은 제약이 존재한다고 할 수 있다. 장섬유, 미세섬유의 함량, 여수도, 충전제의 함량 등이 농도 평가에 어려움을 준다고 할 수 있다. 다른 문제점의 하나는 기존의 측정 방식은 과도한 복잡성으로 인해 과도한 경제적 투자를 필요로 하는 문제를 가지고 있다.

이러한 제약을 극복하기 위해서는 농도와 함수관계를 갖는다고 판단되는 탁도와 투과율 측정을 통한 농도 평가 기술에 대하여 연구하였다. 탁도나 투과율 측정기는 여타의 농도 측정기에 비해 가격

이 저렴하면서 측정법이 수월한 장점이 있다. 이러한 광학적 분석법은 이미 펄프 섬유에 비표면적 평가에 실험적으로 적용성이 검토된 바 있다.⁴⁾ 탁도 및 투과율 측정을 통하여 wet end의 안정성을 확보하기 위한 조절인자 중 가장 중요하다고 생각되는 농도를 평가하기 위한 농도와 탁도, 농도와 투과율의 상관관계를 분석하고 이를 통하여 회귀식을 유도하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 공시재료

본 연구에는 침엽수 및 활엽수 펄프 각 1종 및 중질탄산칼슘(ground calcium carbonate; GCC)과 탈크(Talc)를 실험재료로 이용하였다.

2.2 온라인 탁도 (투과율) 측정 시스템

실시간으로 지료의 농도 변화에 따른 탁도와 투과율을 측정하기 위하여 온라인 탁도 측정 시스템을 구축하였다. 먼저 DDJ(dynamic drainage jar)에서 지로나 혹은 충전물 슬러리가 균일한 농도를 유지할 수 있게 약 600 rpm의 속도로 교반을 하고 연동식 펌프로 연속적인 지료의 흐름을 유도하였다. 연동식 펌프는 Masterflex 펌프로 연동식 펌프에 의해 지료는 약 200 mL/min의 펌프속도로 탁도 측정기로 공급된다. 본 연구에서 사용된 탁도기는 연속적으로 탁도와 투과율을 측정할 수 있는 Hach사의 2100 AN모델을 사용하였다 (Fig. 1). 그리고

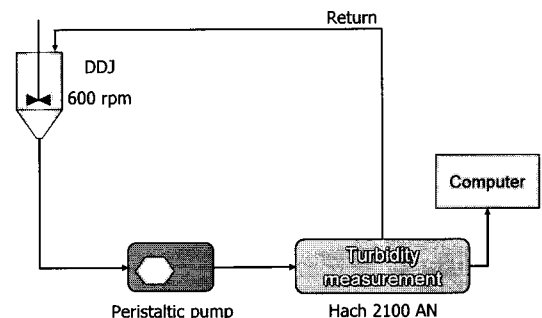


Fig. 1. Schematic diagram of on-line turbidity measurement.

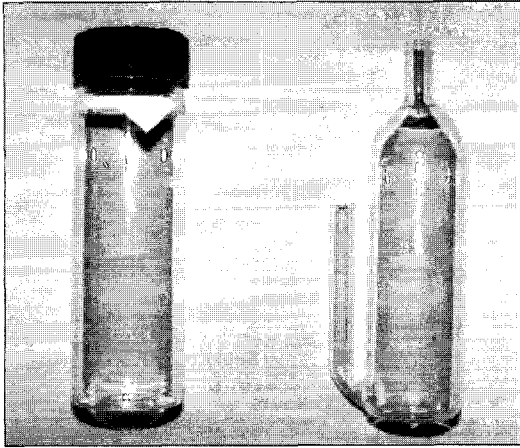


Fig. 2. Conventional cell (left) and new flow cell (right) for turbidity measurement.

연속적인 지료의 흐름에서 탁도를 측정하기 위해서는 측정셀 또한 중요하다 할 수 있다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 일반적으로 사용되는 측정셀 대신 연속적으로 지료를 탁도 측정기로 공급할 수 있게 제작된 새로운 측정셀을 사용하였다. 이러한 구성으로 실험실적으로 온라인 탁도 시스템을 구축하였고 펄프와 충전제의 농도와 탁도 및 투과율의 상관관계를 분석하고 이를 통하여 탁도와 투과율 측정을 통한 지료의 농도를 예측할 수 있는 회귀식을 유도하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 광원의 파장에 따른 농도와 탁도 및 농도와 투과율의 상관관계 평가

광학적 측정에 있어서 광원의 파장은 측정값을 결정하는 중요한 변수이다. 본 연구에서는 탁도 측정기 광원의 파장을 달리하여 펄프 및 충전제의 농도에 따른 탁도와 투과율을 조사하였다. 펄프로는 활엽수 BKP를 470 mL CSF로 고해를 실시한 후 0.5%까지 세분화하여 4가지 파장에서 측정하였고 충전제로는 중질탄산칼슘(ground calcium carbonate; GCC)를 사용하여 0.1%까지 세분화하여 펄프와 동일한 파장에서 측정하였다.

Figs. 3-4에서 볼 수 있듯이 광원의 파장이 짧아짐에 따라 동일한 농도에서 높은 탁도값을 나타내었다. 이는 파장이 짧아짐에 따라 높은 빛의 산란에 기인한 것으로 생각되나 410 nm에서는 탁도 측정기가 불안정하게 작동하였고 측정되는 탁도값의 표준편차도 높아 정확한 탁도 측정이 이루어질 수 없었다. 그리고 610 nm에서 높은 탁도값을 나타내었고 525 nm와 860 nm에서 유사한 수준의 탁도를 나타내었다. 525 nm는 탁도 측정기의 기본 파장으로 사용되는 것으로 미국 표준 탁도 측정 파장이고 860 nm의 파장은 ISO에서 규정하는 탁도 측정 파

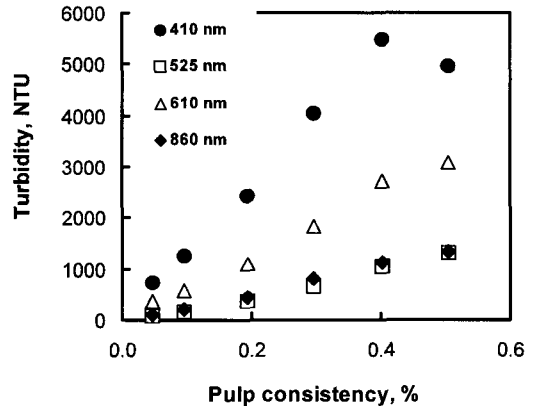


Fig. 3. Effect of the wave-length of light source on turbidity of Hw-BKP.

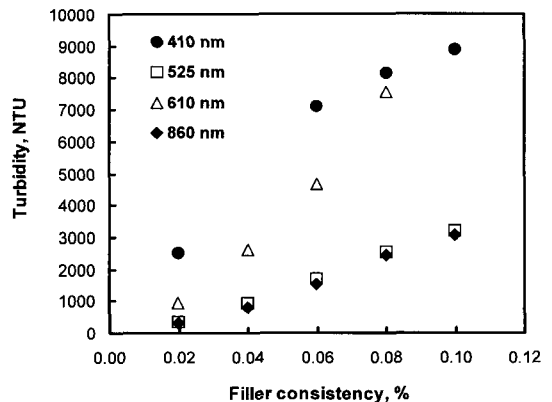


Fig. 4. Effect of the wave-length of light source on turbidity of GCC.

장이다. 그리고 Figs. 5-6에서 볼 수 있듯이 610, 860 nm에서는 탁도 측정기가 펄프나 충전제의 투과율을 측정하지 못하였다. 따라서 본 연구에서 사용되고 있는 탁도측정기는 상대적으로 측정된 탁도의 표준편차가 작으면서 기기의 원활한 작동이 이루어지는 기본적인 파장인 525 nm에서 탁도와 투과율을 측정하였다.

3.2 지료의 구성성분의 농도와 탁도 및 농도와 투과율의 상관관계 분석

펄프로는 활엽수 BKP와 BCTMP를 사용하였고 충전제로는 중질탄산칼슘과 탈크를 사용하였다. 펄

프는 농도를 0.5%까지 세분화하여 탁도 및 투과율을 측정하였고 충전제는 0.1%까지 세분화하여 탁도와 투과율을 측정하였다. 또한 두 종류의 펄프의 경우 동일한 수준의 여수도를 나타내기 위해 BCTMP는 해리기를 이용하여 15,000 rev.으로 해리를 실시하였고 활엽수 BKP는 밸리 비터를 이용하여 10분 해리 및 20분 고해를 실시하였다. 결과적으로 BCTMP는 487 mL CSF, 활엽수 BKP는 470 mL CSF를 나타내었다.

Figs. 7-8에 펄프의 농도를 달리하여 측정된 탁도와 투과율을 나타내었다. 펄프의 농도가 증가함에 따라 탁도는 증가하였고 어느 농도 이상에서는

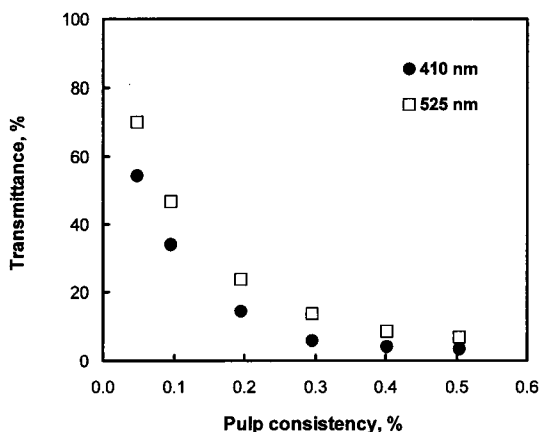


Fig. 5. Effect of the wave-length of light source on transmittance of HW-BKP.

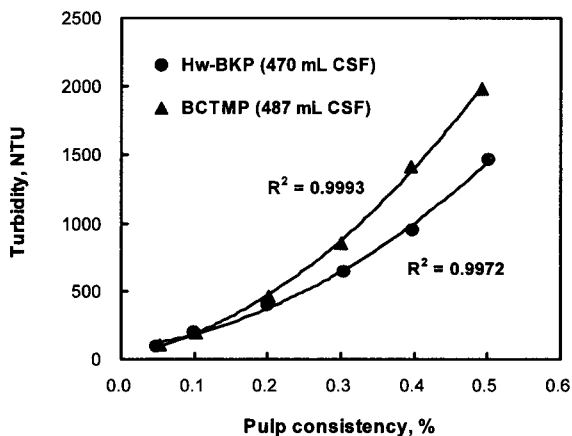


Fig. 7. Relationship between pulp consistency and turbidity.

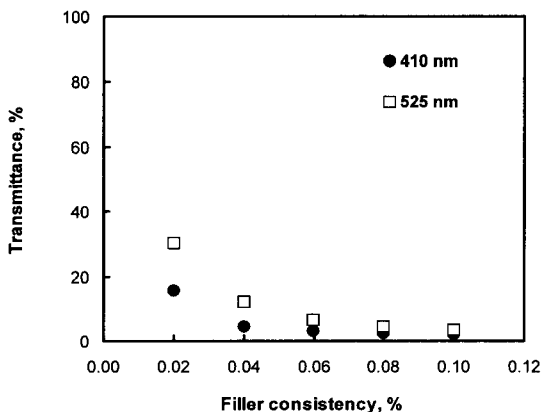


Fig. 6. Effect of the wave-length of light source on transmittance of GCC.

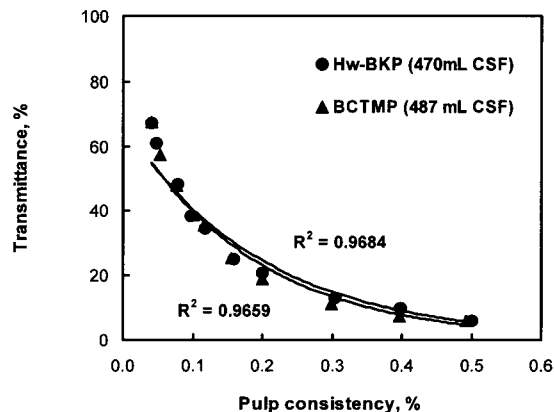


Fig. 8. Relationship between pulp consistency and transmittance.

펄프의 종류에 따라 탁도의 차이가 발생하였다. 그리고 농도와 탁도의 상관관계는 이차함수로 표현되며 두 펄프 모두 높은 상관관계를 나타내었다. 투과율은 펄프의 농도가 증가함에 따라 감소하였고 두 펄프의 종류에 따라 차이가 나타나지 않았으며 펄프의 농도와 투과율은 지수함수적 상관관계를 나타내었다.

Figs. 9-10에서는 충전제의 농도를 달리하여 측정한 탁도와 투과율을 나타내었다. 충전제의 농도가 증가함에 따라 탁도는 증가하였고 펄프와 마찬가지로 농도와 탁도는 이차함수로 표현되며 높은 상관관계를 나타내었다. 그러나 동일한 농도에서

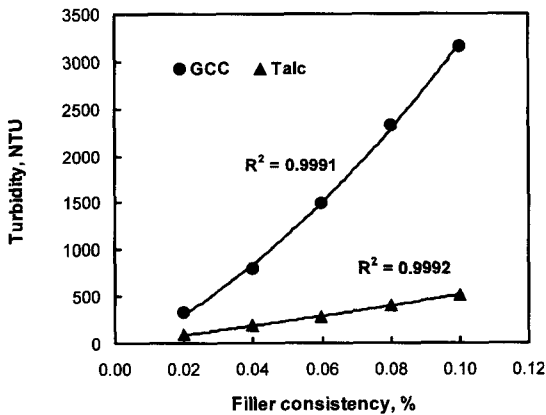


Fig. 9. Relationship between filler consistency and turbidity.

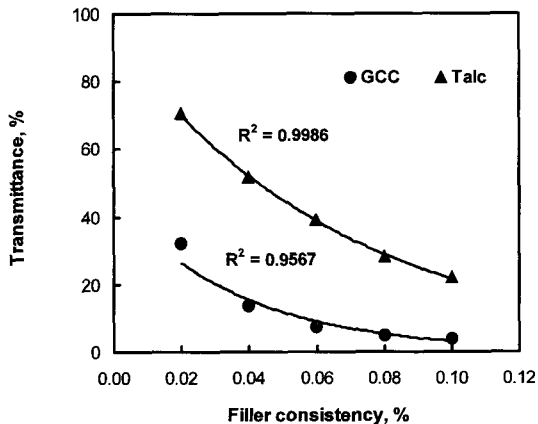


Fig. 10. Relationship between filler consistency and transmittance.

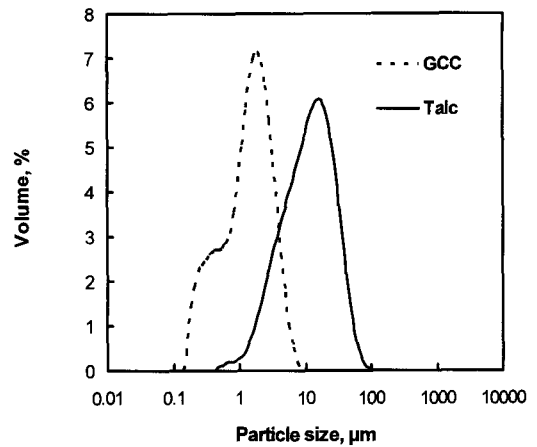


Fig. 11. Particle size distribution of fillers.

충전제의 종류에 따라 다른 탁도를 나타내었는데 이는 입자의 크기와 관련이 있는 것으로 판단된다. Large particle theory에 의하면 탁도는 현탁 내에 존재하는 입자의 비표면적과 비례한다.⁵⁾ 여기서 입자의 크기가 작으면 입자의 비표면적은 증가하기 때문에 결국 동일한 입자 수에서 볼 때 입자의 크기가 작을수록 높은 탁도를 나타낸다. Fig. 11에서 도시된 충전제의 입도 분포와 Table 1에서 나타난 충전제의 입도에서 볼 수 있듯이 중질탄산칼슘이 탈크에 비해 훨씬 작기 때문에 동일한 농도에서 높은 탁도를 나타낸 것으로 판단된다. 투과율도 펄프와 마찬가지로 농도가 증가함에 따라 감소하였고 투과율과 충전제의 농도간에는 지수함수적 상관관계로 표현된다. 그리고 충전제간의 상호 비교를 해보면 탁도와 동일한 경향을 나타내었다. 따라서 광학적 측정을 통한 충전제의 농도 평가 시 입자크기에 따라 다른 접근이 필요하다고 판단된다. 그리고 충전제도 펄프의 경우와 동일하게 이차함수로서 표현되며 높은 상관관계를 나타내었다.

위에서 언급한 바와 같이 농도와 탁도 및 농도와 투과율은 각각 이차함수와 지수함수의 상관관계를 나타내었다. 이를 통하여 농도와 탁도 및 투과율의 회귀식을 Table 2에 나타내었다. 탁도 측정기를 통하여 자료의 탁도와 투과율을 측정하면 탁도의 경우 이차방정식을 통하여, 투과율의 경우 지수방정식을 통하여 자료 혹은 충전제 현탁액의 농도를 구

Table 1. Particle size of fillers

	D(0.5), μm	Surface weighted, μm	Volume weighted, μm
GCC	1.6	0.9	1.9
Talc	12.6	7.2	16.3

Table 2. Regression equations of pulps and fillers

	Turbidity Transmittance	R^2
Hw-BKP (470 mL CSF)	$T = 2699.2 C^2 + 1482.6 C$ $T' = 63.897 \exp(-4.817 C)$	0.9921 0.9659
BCTMP (487 mL CSF)	$T = 5787.7 C^2 + 1201.4 C$ $T' = 64.571 \exp(-5.249 C)$	0.9992 0.9684
Ground calcium carbonate (GCC)	$T = 183286.0 C^2 + 13637.0 C$ $T' = 44.984 \exp(-26.736 C)$	0.9986 0.9567
Talc	$T = 7931.6 C^2 + 4367.8 C$ $T' = 93.897 \exp(-14.729 C)$	0.9991 0.9986

(where C : concentration, T : turbidity, T' : transmittance)

할 수 있다.

4. 결론

효과적인 제지공정의 wet end 제어에 사용될 수 있는 저렴하고 간편하면서도 신뢰성이 높은 농도 측정 기술 개발을 위해서 탁도와 투과율 측정을 통한 농도 평가 기술에 대하여 연구하였다. 본 연구에서는 펄프와 충전물의 농도와 탁도, 농도와 투과율의 상관관계를 분석하였다. 이를 위하여 dynamic drainage jar와 연동식 펌프 및 탁도 측정기로 구성된 측정 측정시스템을 구축하였으며, 연속적인 지료의 흐름에서 탁도를 측정하기 위해서 일반적으로 사용되는 측정셀 대신 연속적으로 지료를 탁도 측정기로 공급할 수 있게 제작된 새로운 측정셀을 사용하였다.

탁도 측정에 사용된 광원의 파장에 따른 영향을 평가한 결과 탁도측정기는 상대적으로 측정된 탁도의 표준편차가 작으면서 기기의 원활한 작동이 이루어지는 기본적인 파장으로 525 nm가 가장 적합한 것으로 나타났다.

펄프와 충전물의 농도가 증가함에 따라 탁도는 증가하였고 펄프와 충전물의 종류에 따라 동일한 농도에서 탁도의 차이가 발생하였다. 그리고 농도와 탁도의 상관관계는 이차함수로 표현할 수 있었으며 모두 높은 상관관계를 나타내었다. 투과율은 펄프의 농도가 증가함에 따라 감소하였고 두 펄프의 종류에 따라 차이가 나타나지 않았으며 펄프의 농도와 투과율은 지수함수적 상관관계를 나타내었다.

농도와 탁도 및 농도와 투과율은 각각 이차함수와 지수함수의 상관관계를 나타내었으며, 이로부터 회귀식을 유도하였다. 이러한 회귀식을 이용하면 탁도 측정기를 통하여 지료의 탁도와 투과율을 측정하면 탁도의 경우 이차방정식을 통하여, 투과율의 경우 지수방정식을 통하여 지료 혹은 충전제 현탁액의 농도를 구할 수 있을 것으로 판단되었다.

사 사

본 연구는 산업자원부 청정생산기술개발사업 지원 하에 수행되었습니다.

인용문헌

1. Lancaster, E.P., Retention: definitions, methods, and calculations, in "Retention of Fines and Fillers During Papermaking", Gess, J.M.(Ed.), TAPPI Press, pp.3-10 (1998).
2. Jansson, I., et al. (Ed.), Accurate consistency, BTG Pulp and Paper Technology AB., pp. 9-31 (1999).
3. Ostroot, G.F., The Consistency Control Book, TAPPI Press, pp.16-29 (1993).
4. Shallhorn, P.M. and Karnis, A., Method and apparatus for on-line monitoring of specific surface of mechanical pulps, U.S. Patent 4,441,960 (1984).
5. Wood, J.R. and Karnis, A., Determination of specific surface area of mechanical pulp fines from turbidity measurements, Paperi Ja Puu-Paper and Timber 78(4):181-186 (1996).