

비혼탁도 법을 이용한 나노 콜로이드 입자의 크기 결정

임경희[†]

중앙대학교 화학신소재공학부
(2007년 12월 2일 접수 ; 2008년 1월 10일 채택)

Determination of Sizes of Nano-Particles by Specific Turbidimetry

Kyung-Hee Lim[†]

*School of Chemical Engineering, Chung-Ang University, Seoul 156-756, Korea
(Received December 2, 2007 ; Accepted January 10, 2008)*

Abstract : In this article a reliable and rapid method based on specific turbidimetry is proposed for the determination of sizes of nanoparticles. Conventionally in specific turbidimetry specific turbidities for a colloidal dispersion are measured as a function of light wavelength, and compared to theoretical values calculated from Mie scattering theory for presumed particle sizes. In contrast specific turbidity at a fixed wavelength is measured in the proposed method, and particle sizes are determined from the prepared calibration curve. The calibration curve is a plot of specific turbidity vs particle size and in this case the specific turbidities are measured for a couple of samples of known sizes.

Keywords: specific turbidity, specific turbidimetry, light scattering, Mie theory, particle size.

1. 서 론

콜로이드 계의 물성은 입자의 모양과 크기로 대표되는 기하학적 변수와 표면 전하량 또는 제타 전위(zeta potential)로 대표되는 전기적 변수에 의해서 지배된다[1]. 콜로이드 분산 계에서 입자의 기하학적 변수는 반 데어 발스 끌어당기는 힘을 결정하고 전기적인 변수는 밀어내는 힘을 규정하므로, 입자의 크기를 결정하는 것은 분산 계의 구조와 성질을 규명하는데 매우 중요한 일이다. 이러한 이유로 나노 콜로이드 입자의 기하학적 변수를 결정하기 위해서 많은 노력이 경주되고 있다.

콜로이드 입자의 전기적인 변수는 적정(titration)에 의하여 표면 전하량을 결정하거나 미세 영동(microelectrophoresis)에 기초한 제타 전위기를 이용하여 결정된다[2]. 이에 반하여 콜로이드 입자의 기하학적 변수는 고체인 경우에는 전자 현미경 등을 사용하고 고체가 아닌 분자 회합 구조체(molecular association structure)는 대체로 빛 산란[3-5], 중성자 산란[6,7], X선 산란[7]과 같은 산란 현상을 이용하여 결정한다. 중성자 산란과 X선 산란은 개인이 보유할 수 없을 정도로 고가이고 운영비도 많이 드는 장치이며, 빛 산란은 개인이 보유할 수 있는 가격대이기는 하지만 산란 변수를 정확하고 정교하게 측정하려면 경제적으로 만만하지 않다. 그런데 빛 산란 현상을 이용하여 입자의 크기를 측정할 수 있는, 상대적으로 상당

[†]주저자 (e-mail : khlim@cau.ac.kr)

히 경제적인 장치로 자외선/가시광선 분광기(UV/VIS spectrometer)가 있다. 이 장치는 연구자들이 쉽게 장만할 수 있는 것으로서 우리 주변에서 잘 발견된다. 그러므로 이 장치를 이용하여 나노 콜로이드 입자의 크기를 측정하는 방법을 개발하는 것은 매우 중요한 의미가 있다.

자외선/가시광선 분광기를 이용하여 나노 콜로이드 입자의 크기를 측정하는 방법은 오랫동안 연구되어 왔다[8-11]. 이 방법에서는 우선 주어진 시료에 대해서 빛 흡광도(absorptivity) A 를 파장 λ_0 의 함수로 측정하고 비혼탁도(specific turbidity) τ_S 를 구한다. 그런 후에는 τ_S 를 가정된 입자 크기에 대해서 산란 모델에 의해 계산한 이론값과 비교하여 크기를 결정한다. Fig. 1은 폴리스타이렌 시료(농도 54 ppm과 107 ppm)에 대하여 자외선/가시광선 분광기로 구한 비혼탁도(점선으로 표시된 두 개의 곡선)과 미(Mie) 산란 이론을 적용하여 계산한 크기가 $0.9 \mu\text{m}$ 와 $1.1 \mu\text{m}$ 인 폴리스타이렌 입자의 이론적인 비혼탁도(실선 곡선)를 보여주고 있다[12]. 54 ppm과 107 ppm에 대한 측정 값과 계산 값들 사이에는 절대 값에서 큰 오차가 있는데 이것은 자외선/가시광선 분광기에서 사용되는 시료용 수정 용기의 폭이 1 cm 정도 밖에 되지 않아 투과한 빛의 상당 부분을 검출하지 못하기 때문이다. 이런 점을 제외하고는 측정된 비혼탁도와 $1.1 \mu\text{m}$ 에 대해서 계산된 비혼탁도가 최고점이 등장하는 파장 그리고 파장에 따른 전체적인 거동이 일치하므로 폴리스타이렌 시료에 들어있는 입자의 크기를 $1.1 \mu\text{m}$ 로 결정할 수 있다.

이와 같이 종래의 방법은 콜로이드 입자에 의한 흡수도 또는 비혼탁도를 파장의 함수로 측정하고 이를 이론값과 비교하여 입자의 크기를 결정한다. 그런데 이 때 이론적인 계산을 하기 위해서는 입자의 굴절률을 파장의 함수로 정확히 알아야 한다. 입자의 굴절률이 문헌에 보고되어 있지 않으면 실제적으로 이 방법에서는 입자의 굴절률을 실험으로 측정해야 하는 번거로움이 도사리고 있다. 이것은 다른 또 하나의 비싼 장치와 정교한 측정을 요구한다.

그러므로 본 논문에서는 비혼탁도의 파장에 따른 거동을 살피고 크기를 알고 있는, 기준이 되는 콜로이드 입자의 비혼탁도를 한 파장에서

만 측정하여 이로부터 알려지지 않은 입자의 크기를 결정하는 방법을 고찰하는데 있다. 이것은 입자의 크기를 신속하게 결정해야 하는 산업체의 처지에서는 절실히 요구되는 방법이므로 이런 방법에 대한 고찰은 상당한 의미가 있다고 생각된다.

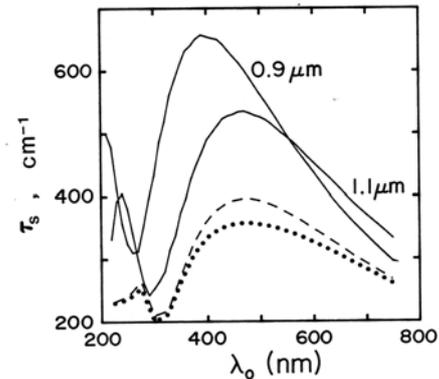


Fig. 1. Specific turbidity τ_S due to scattering vs. wavelength λ_0 in vacuum of polystyrene particles with $1.1 \mu\text{m}$ diameter. Broken and dotted lines represent experimental data for the weight fraction of 54 ppm and 107 ppm, respectively, and full lines represent calculated results for diameter $d = 1.1$ and $0.9 \mu\text{m}$.

2. 이론

물체의 광학적 성질은 굴절률(refractive index)에 의해서 특징지어진다. 굴절률이 물체 전반에 걸쳐서 일정하면 물체를 통과한 빛은 전혀 산란되지 않는다. 그러나 물체 안에 다른 입자가 있거나 국부적으로 밀도가 달라서 굴절률에 변화가 있으면 투과된 빛은 사방으로 산란된다. 이 경우에 산란된 빛의 세기(intensity)를 측정하면 이로부터 입자의 크기, 그리고 분자량, 회전 반지름(radius of gyration)과 같은 분자 성질을 결정할 수 있다.

탄성 산란(elastic scattering)과 단일 산란(single scattering)에서는 Fig. 2에서와 같이 빛의 세기 I_0 , 진공에서의 파장이 λ_0 인 평행파가

굴절률 n_p , 밀도 ρ_p 인 시료에 입사되면 세기가 I_t 인 투과파(transmitted wave)와 I_s 인 산란파(scattered wave)가 생긴다. 탄성 산란에서는 전자파의 진동수가 변하지 않는 것을 말하므로 입사파와 산란파의 진동수는 같다. 단일 산란은 빛 산란이 이웃하는 입자들에 의해서 영향을 받지 않고 또 다중 산란(multiple scattering) [13]이 일어나지 않음을 의미한다. 단일 산란은 실제로는 묽은 계 그리고 부피가 작은 계에서만 일어날 수 있지만 대체로 단일 산란을 가정하여 문제를 해결한다

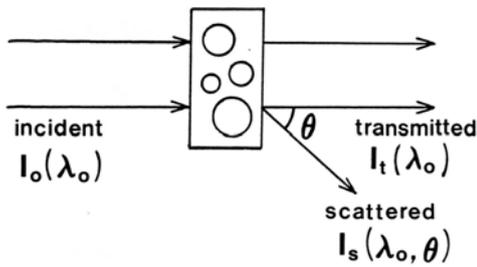


Fig. 2. Scattering geometry.

탄성 산란과 단일 산란의 경우에 입사파와 산란파의 세기는 비어-램버트 법칙(Beer-Lambert law)에 따라 다음과 같이 변한다[14].

$$\frac{I_t}{I_0} = e^{-\tau_B l} \quad (1)$$

여기에서 τ_B 는 길이 당 혼탁도(turbidity)이고 l 은 빛이 시료에서 투과한 길이이다. 흡광도(absorbance) A 는 혼탁도 τ_B 와 다음 관계로 맺어진다.

$$A = \frac{\tau_B l}{\ln 10} = \frac{\tau_B l}{2.303} \quad (2)$$

산란 현상에서는 산란 특성에 따라 웨일리 산란(Rayleigh scattering), 웨일리-데바이-갠스 산란(Rayleigh-Debye-Gans scattering), 미 산란(Mie scattering)으로 나뉜다[3-5,12]. 이들은 모두 무차원 크기 변수 s_p 와 무차원 굴절률 m 으로 규정되는데 s_p 와 m 은 각각

$$s_p \equiv \frac{\pi d}{\lambda} = \frac{\pi d}{(\lambda_0/n_m)} = \frac{\pi d n_m}{\lambda_0} \quad (3)$$

$$m \equiv \frac{n_p}{n_m} \quad (4)$$

로 정의된다. 여기에서 d 는 입자의 크기(지름), n_p 와 n_m 은 각각 입자의 굴절률과 매질의 굴절률, λ 는 용매에서의 빛의 파장이고 λ_0 는 진공 또는 공기 속에서의 빛의 파장을 말한다. 웨일리 산란에서는

$$s_p \ll 1 \quad \text{그리고} \quad s_p m \ll 1 \quad (5)$$

이 만족된다. 그러므로 $m < 2$ 이면 식 (5)의 조건은 $d < \lambda/10$ 임을 말해주는데, 이것은 웨일리 입자의 크기는 빛의 파장보다 훨씬 작음을 의미한다. 이와 같은 웨일리 입자에 대해서 혼탁도 τ_B 는

$$\tau_B = \frac{24\pi^3 M}{N_{Av} \rho_p^2} \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)^2 \frac{c n_m^2}{\lambda_0^4} \quad (6)$$

로 주어진다[4,5]. 여기에서 M 은 분자량, N_{Av} 는 아보가드로 수, ρ_p 는 콜로이드 입자의 밀도, c 는 몰 농도를 가리킨다.

산란이 파장에 어떻게 의존하는가를 설명하기 위해서 지수 g 를 사용한다. g 를 이용하면 τ_B 는

$$\tau_B \propto \lambda_0^{-g} \quad (7)$$

가 되므로 g 를

$$g = - \frac{d \log \tau_B}{d \log \lambda_0} \quad (8)$$

로 정의할 수 있다. 지수 g 의 값은 무차원 크기 s_p 에 매우 예민하다. 그렇지만 웨일리 산란에서는 n_m 과 m 이 λ_0 와 무관하다고 보면 $g=4$ 이다. 일반적으로는 n_m 과 m 이 λ_0 에 따라 약간 변하므로 g 는 4보다 약간 크다.

웨일리-테바이-갠스 산란에서는 식 (5)의 조건 대신에

$$|m-1| \ll 1 \quad \text{그리고} \quad s_p |m-1| \ll 1 \quad (9)$$

이 만족된다. $|m-1|$ 은 일반적으로 1보다 훨씬 작으므로 s_p 는 1 정도이거나 1보다 크다. 이것은 입자의 크기가 λ_0 정도임을 의미한다.

식 (5)나 식 (9)로 주어진 조건이 만족되지 않으면 이 경우에 산란을 미(Mie) 산란이라고 한다. 그러므로 미 산란은 산란 현상에서 일반적인 이론으로서 s_p 와 m 의 어떤 값에 대해서

도 적용될 수 있다. 미 산란에서 비혼탁도 (specific turbidity) τ_s 는

$$\tau_s \equiv \left(\frac{\tau_B}{c_w} \right)_o = \frac{0.01}{\lambda} \left(\frac{\rho_p}{\rho_2} \right) \frac{3\pi}{s_p^3} \sum_{n=1} \frac{|a_n|^2 + |b_n|^2}{2n+1} \quad (10)$$

로 주어진다[4,8]. 여기에서 ρ_2 는 콜로이드 입자와 매질로 이루어진 계의 밀도이고 c_w 는 산란계 100 그램(g) 당 입자의 무게를 말한다. 아래 첨자 o 는 무한 회석 상태에서의 τ_B/c_w 값을 가리킨다. 그리고 혼탁도(turbidity) τ_B 와 비혼탁도(specific turbidity) τ_s 와의 관계가 식 (10)의 첫 번째 등호로 주어짐을 알 수 있다.

식 (10)의 합산 부분에서 a_n 과 b_n 은

$$a_n = \frac{M_n}{D11_n + D12_n}, \quad b_n = \frac{N2_n}{D21_n + D22_n} \quad (11)$$

과 같이 표현되고[8], M_n 과 Dj_n 은 다시

$$M_n = (-1)^n i(2n+1) [m S_n'(s_p) S_n(s_p m) - S_n(s_p) S_n'(s_p m)] \quad (12)$$

$$N2_n = -(-1)^n i(2n+1) [m S_n'(s_p) S_n(s_p m) - S_n(s_p) S_n'(s_p m)] \quad (13)$$

$$D11_n = m S_n'(s_p) S_n(s_p m) - S_n(s_p) S_n'(s_p m) \quad (14)$$

$$D12_n = (-1)^n i [m G_n'(s_p) S_n(s_p m) - G_n(s_p) S_n'(s_p m)] \quad (15)$$

$$D21_n = m S_n(s_p) S_n'(s_p m) - S_n'(s_p) S_n(s_p m) \quad (16)$$

$$D22_n = (-1)^n i [m G_n(s_p) S_n'(s_p m) - G_n'(s_p) S_n(s_p m)] \quad (17)$$

과 같이 정의된다. 여기에서 $S_n(x)$ 와 $G_n(x)$ 는 베셀 함수(Bessel function)[15-17] $J_{n+1/2}(x)$ 와 $J_{-n-1/2}(x)$ 또는 구면 베셀 함수(spherical Bessel function)[15-17] $j_n(x)$ 와 $j_{-n-1}(x)$ 에 다음과 같이 관련된다.

$$S_n(x) = \sqrt{\frac{\pi x}{2}} J_{n+1/2}(x) = x j_n(x) \quad (18)$$

$$G_n(x) = \sqrt{\frac{\pi x}{2}} J_{-n-1/2}(x) = (-1)^{n+1} x j_{-n-1}(x) \quad (19)$$

그리고 $S_n'(x)$ 와 $G_n'(x)$ 는 $S_n(x)$ 와 $G_n(x)$ 를 x 로 미분한 1차 도함수이다.

식 (10)부터 식 (19)에 이르는 식들을 이용하여 비혼탁도 τ_s 를 파장 λ 의 함수로 계산하기 위해서는 관련 수식이 복잡하고 또 베셀 함수의 미분에 대해서 회귀 공식(recursion formula)[15-17]를 적용해야 하므로 컴퓨터 프로그램을 통해야 한다. 이것은 예를 들면 FORTRAN[12]이나 MATLAB 등을 이용하여 이루어질 수 있다. 이와 같은 컴퓨터 프로그램에서 $k > 2$ 인 구면 베셀 함수 $j_{\pm k}(x)$ 와 이의 도함수는 아래와 같은 회귀 공식으로 계산한다.

$$j_{n-1}(x) + j_{n+1}(x) = (2n+1) \frac{j_n(x)}{x} \quad (20)$$

$$(2n+1)j_n'(x) = n j_{n-1}(x) - (n+1)j_{n+1}(x) \quad (21)$$

그리고 이 회귀 공식들은 처음 6 개의 구면 베셀 함수 $j_0(x)$, $j_1(x)$, $j_2(x)$, $j_{-1}(x)$, $j_{-2}(x)$, $j_{-3}(x)$ 로부터 계산된다.

$$j_0(x) = \frac{\sin x}{x} \quad (22)$$

$$j_1(x) = \frac{\sin x}{x^2} - \frac{\cos x}{x} \quad (23)$$

$$j_2(x) = \left(\frac{3}{x^3} - \frac{1}{x} \right) \sin x - \frac{3}{x^3} \cos x \quad (24)$$

$$j_{-1}(x) = \frac{\cos x}{x} \quad (25)$$

$$j_{-2}(x) = -\frac{\cos x}{x^2} - \frac{\sin x}{x} \quad (26)$$

$$j_{-3}(x) = \left(\frac{3}{x^3} - \frac{1}{x} \right) \cos x + \frac{3}{x^3} \sin x \quad (27)$$

비혼탁도 방법(spectroturbidimetry)에 의해서 콜로이드 입자의 크기를 결정하는 순서는 Fig. 1과 관련하여 논의한 바와 같이

- (1) 콜로이드 시료의 흡광도 A 를 측정하고 식 (2)에 의하여 혼탁도 τ_B 를 구한 후에 $\tau_s = (\tau_B/c_w)_o$ 에 의해서 비혼탁도 $\tau_s(\lambda)$ 를 결정함.
- (2) 입자의 크기를 가정하고 이 크기에 대하여 미 산란에 의한 비혼탁도 식 (10)을 적용함으로써 이론적인 $\tau_s(\lambda)$ 를 결정함
- (3) 이론과 실험에 의한 $\tau_s(\lambda)$ 를 비교하여 실험 자료와 일치하는 이론적인 크기를 찾음

의 세 단계로 되어 있다.

3. 결과 및 고찰

미 산란 이론에 의한 비혼탁도 $\tau_s(\lambda)$ 를 계산하기 위하여 작성된 컴퓨터 프로그램이 올바른 결과를 제공하는 것을 우선적으로 확인하였다. 이를 위하여 폴리스타이렌 입자에 대해서 산란 단면적(scattering cross-section) C_{sca} 를

$$C_{sca} = \frac{\lambda^2}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{|a_n|^2 + |b_n|^2}{2n+1} \quad (28)$$

에 따라 계산하였으며 이를 헬러와 팬고니스[8]의 논문에 제시된 결과와 비교하였다. 이 때에 폴리스타이렌 입자의 굴절률 n_p 와 산란 매질인 물의 굴절률 n_m 은

$$n_p = 1.5683 + \frac{10087}{\lambda^2} \quad [\lambda: nm \text{ 단위}] \quad (29)$$

$$n_m = 1.3240 + \frac{3046}{\lambda^2} \quad [\lambda: nm \text{ 단위}] \quad (30)$$

에 따라 계산하였다[4,18]. Table 1에 보인 바와 같이 본 논문에서 사용된 미(Mie) 산란 컴퓨터 프로그램에 의한 계산 결과와 문헌에 보고된 결과가 유효 숫자 4개까지 일치하므로 컴퓨터 프로그램의 신뢰성에는 아무런 문제가 없는 것으로 판단된다. 계산에서 수렴 결과를 얻기 위해서는 식 (10)의 합산 과정에서 많은 수의 항을 필요로 한다. 오차를 작게 할수록 그리고 s_p 가 커질수록 항의 수는 커진다. Fig. 3은 상대 오차를 1 ppm으로 했을 때 s_p 에 따른, 결과가 수렴하기 위한, 합산에서의 항의 수를 보여주고 있다. 수십 개의 항이 필요하다는 것을 알 수 있다.

폴리스타이렌 입자가 물에 분산되어 있는 분산 계에서 폴리스타이렌 입자의 크기에 따른 비혼탁도를 파장의 함수로 계산하였으며 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 이 그림에는 100 nm부터 900 nm의 파장에 걸쳐서 계산되었는데 실제로 200-300 nm에서 분자의 구조를 반영하는 화학적 흡광(chemical absorption)이 일어나므로 이 영역의 비혼탁도는 콜로이드 입자의 크기를 결정하는데 사용되지 않는다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 입자의 크기가 클수록 비혼탁도는 파장 전반에 걸쳐서 작아지고 (y 축 값의 범위가 작아지고) 또 혼탁도가 파장에 따라 변하는 추세도 매우 복잡해진다. 이미 논의한 바와 같이 비혼탁도 방법에 의해서 콜로이드 입자의 크기를 결정하기 위해서는 Fig. 4에 보인

것과 같은 $\tau_s(\lambda)$ 를 구하고 이를 파장의 함수로 측정한 실험적 $\tau_s(\lambda)$ 와 비교하여야 한다.

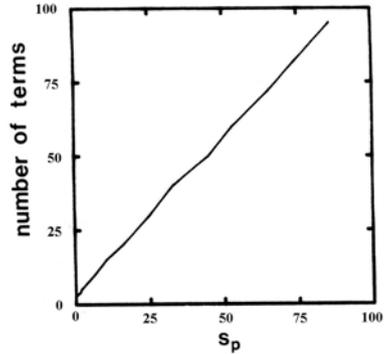


Fig. 3. The number of terms used in Eq. (10) as a function of dimensionless size s_p .

이제 본 논문의 목적에 따라 단일 파장에서 입자의 크기에 따라 비혼탁도가 변하는 추세를 관찰하면 Fig. 5에 보인 바와 같다. 이 그림에 의하면 어떤 단일 파장에서든지 비혼탁도가 입자 크기의 함수로는 최대값 하나를 갖는다. 비혼탁도가 최대인 입자 크기는 측정되는 단일 파장이 커짐에 따라 커진다. 파장이 400 nm일 때에는 입자 크기 700 nm 정도에서 비혼탁도가 최대이지만 800 nm 파장에서는 1 μm 정도가 된다. 이와 같이 단일 파장에서 비혼탁도는 입자 크기가 커짐에 따라 어떤 입자 크기에서 최대가 되고 그 이후에는 줄어든다.

Fig. 5를 이용하여 콜로이드 입자의 크기를 결정할 수 있다. 예를 들면 파장이 400 nm인 빛을 사용하여 비혼탁도가 100 cm^{-1} 로 '측정'되었으면 입자의 크기는 154 nm 이다. 그런데 비혼탁도가 400 cm^{-1} 로 나타나면 비혼탁도가 이 값인 입자의 크기는 350 nm와 1430 nm 이다. 그러므로 이 경우에는 비혼탁도법(spectroturbidimetry)이 bimodal size를 제공한다. 하나는 전형적인 나노 크기이고 다른 하나는 μm 이상의 크기인데, 이와 같은 추세는 파장에 관계없는 공통적인 특징이다.

비혼탁도법이 측정된 값에서 2 개의 입자 크기를 제공한다는 사실은 피상적으로는 혼란스럽지만 실제로는 그렇지 않다. 비혼탁도가 0에서 최대가 되는 입자 크기까지의 정보만을 사용하면 입자 크기를 하나만 결정할 수 있기 때문이다. 더욱이 측정하는 단일 파장이 클수록

Table 1. Comparison of scattering cross-section C_{sca} calculated by Eq. (28) to those reported in reference [8].

$\alpha = \pi d/\lambda$	Scattering Cross Section C_{sca}	
	Eq. (10)	Heller and Pangonis (1957)
0.2	3.69403×10^{-6}	3.69441×10^{-6}
0.4	2.30641×10^{-4}	2.30643×10^{-4}
0.6	2.51224×10^{-3}	2.51233×10^{-3}
0.8	1.31647×10^{-2}	1.31646×10^{-2}
1.0	4.54124×10^{-2}	4.54125×10^{-2}
1.8	7.93679×10^{-1}	7.93681×10^{-1}
2.2	2.01546	2.01551
2.6	4.32729	4.32729
2.8	5.90015	5.90023
3.0	7.82486	7.82478
6.2	1.26673×10^2	1.26494×10^2
6.8	1.71044×10^2	1.71044×10^2
7.2	2.05678×10^2	2.05699×10^2
7.4	2.23492×10^2	2.23509×10^2
7.6	2.41637×10^2	2.41652×10^2
7.8	2.60872×10^2	2.60887×10^2
8.0	2.81131×10^2	2.81146×10^2
8.2	3.01413×10^2	3.01431×10^2
8.4	3.21379×10^2	3.21396×10^2
8.8	3.63710×10^2	3.63732×10^2
9.0	3.85603×10^2	3.85621×10^2
9.2	4.06346×10^2	4.06359×10^2
9.4	4.26604×10^2	4.26621×10^2
9.6	4.48010×10^2	4.48029×10^2
10.0	4.941414×10^2	4.941419×10^2
10.2	5.10405×10^2	5.10421×10^2
10.6	5.49802×10^2	5.49836×10^2
11.0	5.87412×10^2	5.49852×10^2
11.4	6.19602×10^2	6.19646×10^2
11.8	6.52326×10^2	6.52370×10^2
12.2	6.75351×10^2	6.75415×10^2
12.6	7.02016×10^2	7.02078×10^2
13.0	7.14904×10^2	7.14986×10^2
13.4	7.33530×10^2	7.33596×10^2
13.8	7.39415×10^2	7.39496×10^2
14.0	7.40509×10^2	7.40584×10^2
15.0	7.46764×10^2	7.46857×10^2

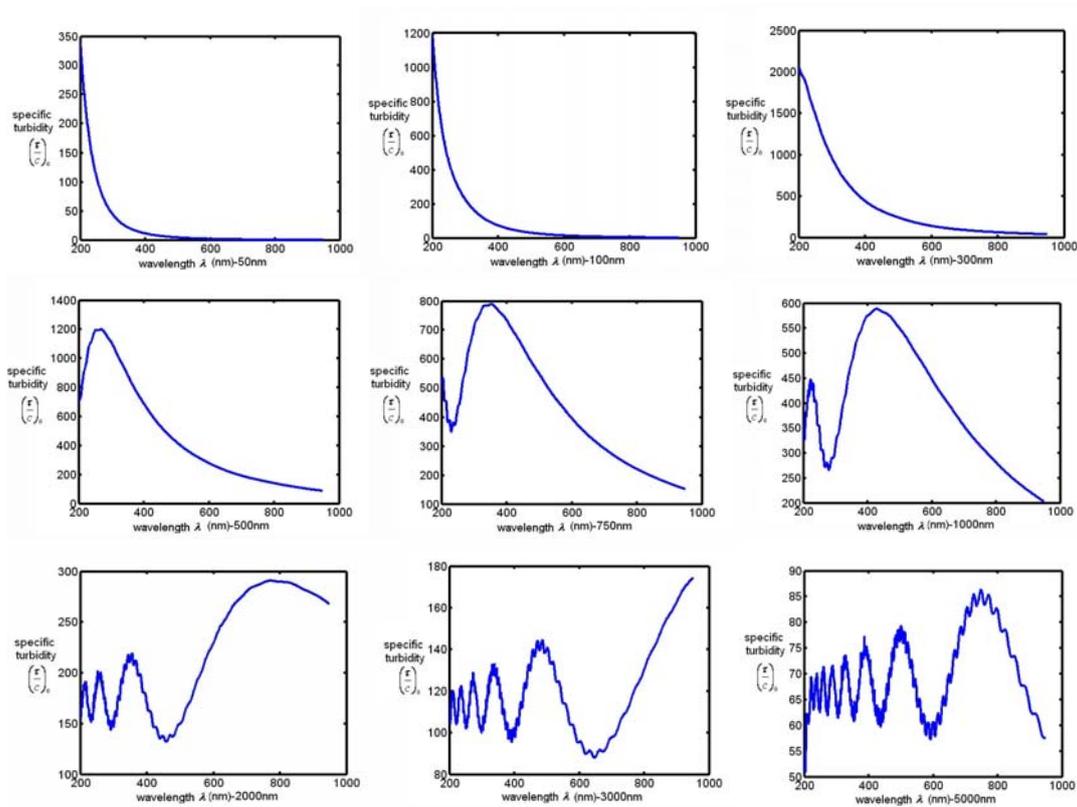


Fig. 4. Specific turbidities τ_S as a function of wavelength λ for various particle sizes. (right to lower: 50, 100, 300, 500, 750, 1000, 2000, 3000, and 5000 nm)

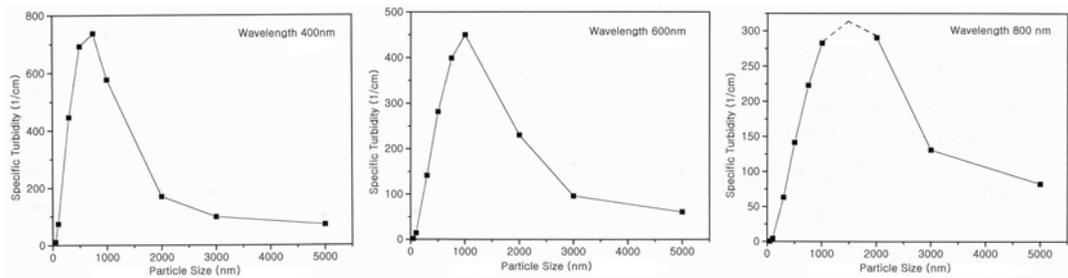


Fig. 5. Specific turbidities τ_S as a function of wavelength for fixed wavelengths of 400, 600, and 800 nm.

비혼탁도가 최대인 파장도 커지고 이 값은 대체로 $1.5 \mu\text{m}$ 정도까지이므로 나노 입자의 크기를 결정하는데 아무런 문제가 되지 않는다. 예를 들면 600 nm 파장의 빛을 사용하여 비혼탁도를 측정하면 비혼탁도가 최대인 입자 크기는 $1 \mu\text{m}$ 이므로 실제적으로 나노 크기의 영역은 전

부 담당되는 셈이다. 더욱이 중요한 사실은 비혼탁도가 0에서 최대가 되는 지점까지는 입자 크기에 따라 거의 직선적으로 변하고 기울기도 가파르므로 비교적 정확하게 입자 크기를 결정할 수 있다는 것이다.

본 연구에서는 분산 입자들이 단일 크기를

갖는 경우를 가정하여 분석하였다. 실제로 입자 크기는 분포를 가지므로 실제 시료에 대해서는 위에서 논의한 방법이 적용될지 의문을 가질 수 있다. 입자 크기를 결정하는 다른 방법들도 대표 크기 또는 평균 크기를 제공하므로 이런 점에서는 본 방법도 다른 방법들만큼 충분히 신뢰할 만하다고 생각된다.

4. 결 론

비혼탁도 법(specific turbidimetry)을 이용하여 나노 콜로이드 입자의 크기를 단일 파장에서 신속하게 결정할 수 있는 방안을 고찰하였다. 계산은 폴리스타이렌 입자에 대해서 수행되었지만 여러 다른 콜로이드 입자에 적용될 수 있다. 측정하고자 하는 단일 파장을 고정하고 (예를 들면 600 nm) 알려진 크기의 입자들에 대해서 Fig. 5와 같은 플롯을 만들어서 입자 크기의 기준으로 삼는다. 이 때 대체로 $1\mu\text{m}$ 정도까지의 입자에 대해서 비혼탁도를 측정한다. (비혼탁도-입자 크기 플롯이 거의 직선이 된다). 그런 후에 입자 크기를 모르는 시료의 비혼탁도를 측정하면 기준 플롯에서 바로 입자 크기를 읽어서 결정할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2005년도 중앙대학교 교내 학술 연구비 지원에 의한 것이므로 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. K.-H. Lim, Colloids, Interfaces, and Polymers, in preparation, 2008.
2. R. J. Hunter, Zeta Potential in Colloid Science, Academic, London, 1981.
3. W. Brown, ed., Light Scattering, Principles and Development, Clarendon, Oxford, 1996.
4. M. Kerker, Scattering of Light and Other Electromagnetic Radiation, Academic, New York, 1969.
5. H. C. van de Hulst, Light Scattering by Small Particles, Wiley, New York, 1957.
6. Y. A. Izyumov, N. A. Chernoplekov, Neutron Spectroscopy, Consultants Bureau, London, 1985.
7. L. A. Feigin, D. I. Svergun, Structure Analysis by Small-Angle X-ray and Neutron Scattering, Plenum, New York, 1988.
8. W. Heller, W. J. Pangonis, Theoretical Investigations on the Light Scattering of Colloidal Spheres. I. The Specific Turbidity, *J. Chem. Phys.*, **26**, 498 (1957).
9. N. Fiedler-Ferrari, H. M. Nussenzveig, Mie Scattering near the Critical Angle, *Part. Charact.*, **4**, 147 (1987).
10. R. L. Zollars, Turbidimetric Method for Determination of Latex Particle Size Distribution, *J. Disp. Sci. Technol.*, **2**, 331 (1981).
11. M. Frenkel, R. Schwartz, N. Garti, Turbidity Measurements as a Technique for Evaluation of Water-in-Oil Emulsion Stability, *J. Disp. Sci. Technol.*, **3**, 195 (1982).
12. K.-H. Lim, Ph. D. Thesis, Purdue University, 1985.
13. S. Fraden, G. Maret, Multiple Light Scattering from Concentrated, Interacting Suspensions, *Phys. Rev. Lett.*, **65**, 512 (1990).
14. I. N. Levine, Physical Chemistry, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 1988.
15. G. B. Arfken, H. J. Weber, Mathematical Methods for Physicists, 4th ed., Academic, London, 1995.
16. M. L. Boas, Mathematical Methods in the Physical Science, 2nd ed., Wiley, New York, 1996.
17. F. B. Hildebrand, Advanced Calculus for Applications, 2nd ed., Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1976.
18. J. B. Bateman, E. J. Weneck, D. C. Eshler, Determination of particle size and concentration from spectrophotometric transmission, *J. Colloid Sci.*, **14**, 308 (1959).