研究論文

透明細管内径測定法*

小島 昇** 今橋 拓也***

Inner Radius Measuring Method of Transparent Capillary

Noboru KOJIMA and Takuya IMAHASHI

This paper describes optical measuring method to obtain inner radius of transparent capillary. There are two modes as to optical path which beam refracts and transmits in the capillary. These modes are called tangential mode and one order reflection mode. The inner radius of the capillary can be obtained by measuring transmission angle and transmission distance in each mode. The angle and distance are measured automatically by using rotary table and X table assembled stepping motor controllable by a microcomputer. The optical intensity of transmitted beam is transformed into voltage by a phototransistor and the determination of the angle and distance is performed by detecting maximum voltage. In spite of optical measurement, it is not necessary in this method to measure the index of refraction of capillary material. From experimental results the accuracy of new measuring method is $\pm 1/500$ mm.

Key words: inner radius, optical measurement, transparent capillary, index of refraction, tangential mode, 1 order reflection mode, transmission angle, transmission distance

1. ま え が き

細管を用いた粘度測定では、一般に、より簡単で精密測定が可能な比較測定法が用いられる。そのためには、粘度標準液を用いて前もって粘度計定数を求めておかなければならない。

より精密な粘度測定を行うには、粘度計定数を精密に求める必要があることから、特に、細管の内径をより精密に求めることが要求される。

透明細管の管軸に直角に平行レーザ光を照射した場合、透明細管内を内径に接して透過する光線及び内径面上の一点で反射して透過する光線は、それぞれ透明細管の中心に対称に現れて透明細管外に抜ける。

前報¹⁾では、外径面上に対称に現れる光線間の距離をそれぞれ求めることにより内径を算出したが、内径が小さく(約4 mm以下)になると、両者の光線が重なり、それぞれの距離測定ができず、細管の内径測定は不可

能であった。

本報では、内径に接する光線が透明細管外に抜けるとき、透過光が平行レーザ光の光軸となす角及び内径面上で反射して入射レーザ光と平行に抜ける管軸に対して対称な一対の光線間の距離とから、透明細管の屈折率を用いずに、透明細管の内径を算出する理論式を導き、実験結果から比較的高精度の内径測定が可能であることを明らかにする。

なお、本研究では、光源にレーザ光を用いたため、透過光の角度および距離を目視により検出するのは肉眼への危険性があるので、マイクロコンピュータで制御可能な回転テーブルとXYテーブルとを一体化し、かつ、透過光の光強度を光電変換するためのフォトトランジスタを回転テーブル上に固定した光検出装置を製作し、マイクロコンピュータにより角度及び距離の自動計測を可能とした。

2. 測 定 理 論

透明細管の管軸に対し直角に平行光線を照射した場合、透明細管内を内径に接して透過する光線と内径面上の一点で反射して透明細管外に平行光線の光軸に平行に抜ける光線とが検出可能である。以後、前者の場

* 原稿受付 平成 2年10月31日。昭和63年度精密工学会秋季大会学術講演会(昭和63年10月 3日)及び山梨地方講演会(平成 2年10月27日)にて発表

** 正 会 員 明治大学理工学部(川崎市多摩区東三田 1-1-1)

*** 学生会員 明治大学工学部

Fig.1 Tangential mode

合を接線モード及び後者の場合を1次反射モードと呼ぶ。

2. 1 接線モード

図1に示すように、透明細管に照射された平行光線のうち、A点で入射した光線は屈折して内径面上のC点で接し、外径面上のB点で再び屈折して透明細管外に抜ける。

このときの透明細管外に抜けた透過光と平行光線の光軸とのなす角 θ （以後、透過角と呼ぶ）とA点における入射角 i 及び屈折角 r との関係は幾何学的に次式のように求められる。

$$i = r + \frac{\theta}{2} \quad (1)$$

また、屈折の法則により、透明細管材料の屈折率を n とすると

$$n = \frac{\sin i}{\sin r}$$

上式に式(1)を代入すると

$$\begin{aligned} n &= \frac{\sin(r + \frac{\theta}{2})}{\sin r} \\ &= \frac{\sin r \cos \frac{\theta}{2} + \sin \frac{\theta}{2} \cos r}{\sin r} \end{aligned} \quad (2)$$

屈折角は透明細管の内径 d 及び外径 D を用いて次式のように表される。

$$\sin r = \frac{d}{D}$$

または

$$\cos r = \sqrt{1 - \frac{d^2}{D^2}}$$

これらの式を式(2)に代入すると、接線モードにおける透明細管の内径、外径、屈折率及び透過角を含ん

Fig.2 One order reflection mode

だ関係式が次のように導かれる。

$$\left(n^2 - 2n \cos \frac{\theta}{2} + 1 \right) d^2 - D^2 \sin^2 \frac{\theta}{2} = 0 \quad (3)$$

2. 2 1次反射モード

図2に示すように、平行光線のうちA'点で入射・屈折した光線は内径面上のC'点で反射し、外径面上のB'点で屈折して透明細管外に平行光線の光軸と平行に抜ける。このときの透過光の2光線間の距離 a （以後、透過距離と呼ぶ）と内径との関係は接線モードの場合と同様に、幾何学的に次式のように求められる。

$$\{ n^2 (D^2 - a^2) - a^2 \} d^2 + 2a^3 d - a^2 D^2 = 0 \quad (4)$$

2. 3 内径及び屈折率

式(3)及び式(4)にはそれぞれ透明細管材料の屈折率が含まれているので、これらの式を単独に用いて内径を求めるには透明細管材料の屈折率を前もって求めておく必要がある。

そこで、両式を連立させて屈折率を消去すると、内径に関する4次の多項式が次式のように導かれる。

$$A_1 \frac{d^4}{D^4} + A_2 \frac{d^3}{D^3} + A_3 \frac{d^2}{D^2} + A_4 \frac{d}{D} + A_5 = 0 \quad (5)$$

ここに、

$$A_1 = 1 - 4 \frac{a^2}{D^2} \left(1 - \frac{a^2}{D^2} \right) \cos^2 \frac{\theta}{2}$$

$$A_2 = -4 \frac{a^3}{D^3} \left\{ 1 - 2 \left(1 - \frac{a^2}{D^2} \right) \cos^2 \frac{\theta}{2} \right\}$$

$$\begin{aligned} A_3 = 2 \left\{ \frac{a^2}{D^2} \left(1 + 2 \frac{a^4}{D^4} \right) - \left(1 - \frac{a^2}{D^2} \right) \sin^2 \frac{\theta}{2} \right. \\ \left. - 2 \frac{a^2}{D^2} \left(1 - \frac{a^2}{D^2} \right) \cos^2 \frac{\theta}{2} \right\} \end{aligned}$$

$$A_4 = -4 \frac{a^3}{D^3} \left\{ \frac{a^2}{D^2} - \left(1 - \frac{a^2}{D^2} \right) \sin^2 \frac{\theta}{2} \right\}$$

Fig. 3 Optical arrangement of experimental apparatus (not to scale)

$$A_5 = \left\{ \frac{a^2}{D^2} - \left(1 - \frac{a^2}{D^2} \right) \sin^2 \frac{\theta}{2} \right\}^2$$

さらに、式(4)より透明細管材料の屈折率は次式のように導かれる。

$$n = \frac{\frac{a}{D} \sqrt{\frac{a^2}{D^2} - 2 \frac{a}{D} \frac{d}{D} + 1}}{\frac{d}{D} \sqrt{1 - \frac{a^2}{D^2}}} \quad (6)$$

よって、透明細管の外径を前もって測定しておけば、各モードにおける透過角及び透過距離のみの測定で、式(5)及び式(6)から透明細管の内径及び透明細管材料の屈折率が求められる。

3. 実験装置と実験方法

3. 1 光学系

図3は実験装置の光学系の概略図を示したもので、光源に用いたHe-Neレーザ光はビームエキスパンダにより拡大された後、コリメータレンズにより平行光線になり、さらに、上下2枚のナイフエッジで構成されるナイフエッジスリットを通して約3 mm幅の帯状平行光線になる。

XYテーブルのX軸は平行光線の光軸に対し直角になるように調整して固定されている。

回転テーブル上には2枚のスリット、凸レンズ及びフォトリジスタが配置され、これらの受光軸は同一直線上にあり、かつ、回転テーブルの回転中心上に合致させてある。

2枚のスリットには、光源側が幅0.2 mmのスリット（斜光阻止用）、受光側（フォトリジスタ側）に幅0.05 mmのスリット（直進光受光用）を使用し、受光軸に対し斜め方向から入る光を遮断し、受光軸に合致した光線のみをフォトリジスタに入射させる。

凸レンズの前焦点上にある幅0.05 mmのスリットの開口面のフラウンホーファ回折像²⁾（光強度）は、凸レンズの後焦点上に置かれたフォトリジスタにより光電変換される。

3. 2 光電変換回路

透明細管外に抜けた透過光の光強度は数 μ W（光源に用いるレーザ光の強度、透明細管の外径及び材質により多少異なる）と非常に微弱であるので、フォトリジスタで光電変換された電圧を増幅しなければならない。

しかし、フォトリジスタは光を受光していないときにおいても暗電流が流れているので、フォトリジスタの出力電圧は暗電流による電圧と光強度による電圧とを加えたものとなり、さらに、本測定法では、光強度による電圧より暗電流による電圧の方が高いので、出力電圧をそのまま増幅した場合、光強度の変化による電圧変化を検出することができない。

そこで、2個の同一特性のフォトリジスタを使用し、一方を光を受光するアクティブ用とし、他方を暗箱の中に置いて暗電流のみによる電圧を発生させるダミー用とし、アクティブ側の電圧からダミー側の電圧をオペアンプで減じ、光強度の変化による電圧の変化分のみを増幅できる図4に示すような電圧増幅回路をA/Dコンバータの前段に組み込んでいる。

Fig. 4 Diagram of electric circuit for converting light intensity into voltage

3. 3 測定システム

図5に本研究において開発した測定システムの構成の概略図を示す。

それぞれのテーブルにはステッピングモータが組み込まれており、ステッピングモータドライバを介してマイクロコンピュータにより各テーブルの回転及び移動が制御される。同時に、回転テーブル上に固定されたフォトトランジスタにより光強度を光電変換し、A/Dコンバータを介して光強度に対応した電圧がマイクロコンピュータに入力される。このような構成により、各試料に対し透過角及び透過距離の自動計測を可

能にした。

図1に示す透過角の中心（透明円管外径面上のB点）と回転テーブルの回転中心とは合致していなければならないが、実際には、透過光の延長線上に回転テーブルの回転中心が存在すれば、回転テーブルの回転により透過光と受光軸とは必ず合致するので、原理的には必ずしも透過角の中心と回転テーブルの回転中心を合致させる必要はない。

透過光と受光軸が合致していないとき（受光軸に対し透過光が斜めになる）には、検出される光強度は、受光系に2枚のスリットを用いたことにより、非常に微弱になり、一方、回転テーブルを回転させて透過光と受光軸が合致したときには、検出される光強度は最大となる。このときの回転角に対する光強度の変化は零の状態から最大値に急激に立ち上がる。

そこで、透過角を測定する場合、前もって回転テーブルの回転（ 0.0006° / ステップ）に対する電圧の立ち上がり角度が、より急峻に（受光軸と透過光が回転テーブルの回転によって合致する）なるように、回転中心の位置をY軸の移動により調整しておく。

透過距離の測定は、受光軸と平行光線の中心軸とを平行にしたのち、Xテーブルの移動により行う。

なお、受光軸と平行光線の光軸とを前もって平行に調整したときの回転テーブルに刻印されている角度目盛り値を記録しておくことにより、光検出装置のセッティングを変えない限り、受光軸と平行光線の光軸との平行合わせは、その角度目盛り値に回転テーブルを合わせるだけで、常に、容易に行うことができる。

3. 4 透明細管試料

透明細管試料の材質にはガラス及びアクリル樹脂の

Fig. 5 Block diagram of measuring system

2種類を選び、ガラス製細管は細管式粘度計の細管部分を用い、また、アクリル樹脂製細管は旋盤加工により製作した。各試料の寸法範囲は内径が約0.6~3.0mm、外径が約5.8~7.8mmである。

各細管は内外径とも厳密には真円ではなく、また、内外径とも多少偏心しており、円周方向の位置により内径及び外径は多少異なるので、円周方向を8等分して透明細管の円周方向に対する内径測定位置を決める。

4. 実験結果と考察

図6及び図7は透過角及び透過距離を測定した結果をプロットに作図した一例である。

Fig.6 Example of measurement result of transmission angle

Fig.7 Example of measurement result of transmission distance

透過角の測定の場合、受光軸と透過光とが合致したとき、検出される光強度は最大となるので、図6における光電変換された電圧が最大となるときの回転テーブルの回転角が求める透過角になる。

透過距離の測定の場合、透過光は透明細管の中心に對し対称に現れ、図7に示すように光強度に對応した電圧の二つの山の形で求められる。

この場合、図8に示すように、検出すべき透過光は透明細管の中心に對し対称に現れた二つの光束のそれぞれの内側であり、さらに、スリットの幅は有限であることから、左側の山の最大値の位置はスリット幅の1/2だけ小さく、他方、右側の山の最大値の位置はスリット幅の1/2だけ大きく測定される。それゆえ、求めるべき透過距離は測定された二つの山の最大値間の距離からスリット幅を減じた値となる。

なお、回転テーブルの回転及びXテーブルの移動を電圧の最大値前後は細かく(0.0006°/ステップ及び0.0001 mm/ステップ)、それ以外のところでは粗く(0.12°/ステップ及び0.02 mm/ステップ)なるようにソフト上でステッピングモータを2段階制御にし

Fig.8 Relation between transmission light and slit

Fig.9 Residuals subtracted direct measured values from calculated values on inner radius

て透過角及び透過距離の測定を自動化した結果、測定時間を約90分から約20分と大幅に短縮でき、かつ、測定の分解能を低下させることなしに、比較的高精度の測定を可能にした。

図9は工具顕微鏡により直接求めた内径の実測値に対する本測定法により求めた内径の計算値のばらつき(残差)を示したものである。

図から明らかなように、それぞれの残差は $\pm 2/1000$ mm以内に、さらに、それらの内の50%以上が $\pm 1/1000$ mm以内に納まっており、 $\pm 1/500$ mmの精度は十分保証でき、透明細管の真円度ないし内外径の偏心量などの条件が良ければ $\pm 1/1000$ mmの測定精度も可能であると考えられる。

なお、透過角及び透過距離からの内径算出は前もって測定した外径を用いて、式(5)を逐次近似法を利用してマイクロコンピュータで計算処理して行った。

図10は式(5)から求めた内径及び、外径と式(6)を用いて透明細管材料の屈折率をそれぞれの内径に対して求めたものであり、1.48~1.55の範囲内でばらついた値を示している。

この原因は、透明細管の真円度、内外径の偏心及び細管材質の不均一性などにより、ばらついたのではないかと考えられる。

5. む す び

本研究で得られた主な結論を要約すると次のようになる。

Fig.10 Calculated results of the index of refraction

- (1) 光学的測定法であるので、細管を切断する必要がなく、これまで不可能であった透明細管の内径(4 mm以下)を非接触で測定可能とする方法を開発した。
- (2) その方法は、光学的原理により、光強度の最大位置の検出から内径が求められ、屈折率の測定は不要である。
- (3) 角度及び距離測定において、ステッピングモータの2段階制御を導入した自動化により、測定時間が約20分と大幅な時間短縮が達成された。
- (4) 本測定法の保証精度は $\pm 1/500$ mmであるが、細管の条件が良ければ測定精度は $\pm 1/1000$ mmも可能であり、細管式粘度計の細管部分の内径及び光ファイバのコアの直径などの測定に応用できる十分な精度である。

今後の課題としては、透明細管の非接触内径測定の完全自動化のためのシステム開発を図りたいと考える。

謝 辞

本研究遂行にあたり、明治大学工学部精密工学科計測工学研究室の卒業生諸氏にご協力いただいたことに深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 小島 昇：透明円管の非破壊内径測定法，精密工学会誌，54,10 (1988) 1938.
- 2) 小瀬輝次ほか：光工学ハンドブック，朝倉書店 (1986) 45.