

미소용량형 토크변환기에 의한 점도측정에 관한 연구

김갑용*

A Study on the Measurement of Viscosity by the Small Capacity Torque Transducer

Gap Yong Kim*

ABSTRACT

Recently, the rheology on the fluidity of materials has been progressed remarkably.

Viscosity measurement for precision-accuracy has needed very important to measure the rheological properties of materials in the field of chemistry-fiber, paint, printing-ink, plastics, rubber, foodstuff-industry, etc. And many methods of measurement have been developed lately.

So in this experimental study, small capacity torque transducer with type of strain gage, different method against other existing viscometers, measured viscosity about a liquid that has flowing characteristics of newtonian liquid.

Using the assumed computational equation of viscosity, it has same value of viscosity in each different radius of rotating cylinder.

In the result, this equipment will be used in the viscosity measurement of a liquid taking flowing characteristics of newtonian liquid.

Key Words : precision-accuracy(정밀정확), chemistry-fiber(화학섬유), printing-ink(인쇄잉크), foodstuff-industry(식품공업), viscometer(점도계), viscosity(점도), flowing characteristics(유동특성), newtonian liquid(뉴턴유동체)

1. 서론

최근에 유동학(Rheology)^{[1][2]}은 매우 급속도로 발전하고 있으며 화학섬유, 페인트, 인쇄잉크, 합성수지와 고무 및 식품공업 분야에도 이와 같은 레

올로지 성질^{[3][4]}을 파악하는 것이 매우 중요시되고 있다. 따라서 유동특성을 정밀정확 하게 측정해야 할 필요가 있다. 이에 최근의 고분자 물질과 그밖의 물질 유동성에 대한 연구로 하여금 여러 가지 복잡한 유동성을 규명중에 있다. 이와 같은 물질

* 대림대학 기계과

의 유동학적 성질(Rheological Properties)을 알아내기 위한 측정장치가 레오미터(Rheometer)인데 본 연구에서는 물질의 점성을 구하고자 하는 점도계(Viscometer)를 미소용량토크 변환기를 이용하여 몇 가지 유동체에 대한 실험을 하였다.

현재 사용되고 있는 점도측정 장비로는 비틀림(Torsion bar)에 의한 원리를 이용한 방법이라든가 음차(音叉)의 진동 감쇠방법으로 점도를 측정하는 방법 등이 주로 사용되고 있다. 본 연구는 동심원통에 부착된 스트레인 게이지에 의해 비교적 정밀정확도가 높게 회전토크를 검출할 수 있는 스트레인 게이지식 미소토크 변환기^[5]를 이용하여 전기식으로 점도를 측정할 수 있는 측정원리를 제시하고, 이를 실험에 의해 검증함으로써 실용화의 가능성을 확인해 보고자 한 것이다.

액체는 유동^[6]에 따라서 뉴턴유동^[7]과 비뉴턴유동^[8] 등으로 나누어지며 그에 따른 시험장치^{[9][10][11]}도 다르다. 또한 이런 분류에 따라 점도의 측정은 서로 다른 가상식을 사용해서 구해져야만 한다.

본 실험은 외팔보(Cantilever beam)를 이용한 스트레인 게이지의 저항 변화 값으로부터 점도를 측정해내는 방법을 모색하였다. 이 실험장치로부터 측정을 통해 토크 값을 얻을 수 있으며, 구한 토크 값으로부터 점도측정 공식에 적용한 결과 몇 가지 제작상의 문제점이 도출되었으며 이를 시정만 하면 종래의 회전식 또는 단자에 사용하고 있는 음차(音叉)식보다 사용 목적에 따라서는 매우 유용하다는 것이 입증되었다.

2. 회전식 점도계 측정원리

2.1 토크변환기의 원리

토크변환기는 Fig.1과 같이 동일축을 중심축으로 하여 180도 방향의 외팔보에 작용되는 굽힘으로 인해서 생기는 스트레인게이지의 저항치 변화^[12]를 브리지회로를 통해서 전기출력으로 토크 값을 얻을 수 있다.

즉, 외팔보에 작용되는 토크와 외팔보에 접착된 게이지의 저항변화로 인한 전기량과의 관계식은 다음과 같다.

$$e_o = F\epsilon e_i = F \frac{6T}{Eb h_1^2} e_i \quad (1)$$

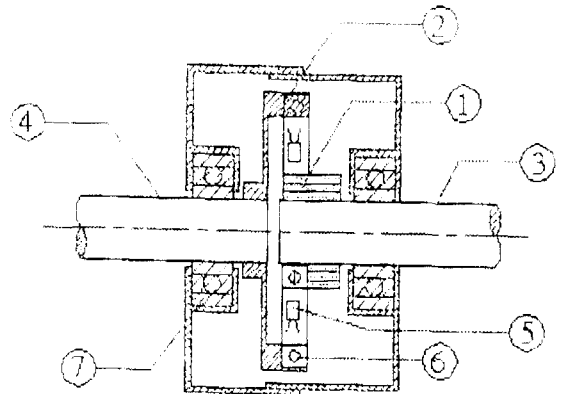


Fig. 1 Assembly trial manufacture of cantilever type torque transducer

Table 1 Nomenclature of trial rotation type torque transducer

No	Nomenclature
①	Cantilever beam (BeCu)
②	Driving side rotation plate
③	Loading shaft
④	Driving shaft
⑤	Strain gauge (350Ω)
⑥	Contact point (Small steel ball)
⑦	Ball bearing for shaft supporting

여기서, e_i : 입력전압

e_o : 출력전압

F : Gage factor

E, b, h_1 : 외팔보 재료의 탄성계수, 폭, 두께

T : 외팔보에 작용하는 토크

직접 이 (1) 식으로부터 필요한 토크 값이 바로 구해지지 않는다. 측정장치를 통해 스트레인 값이 얻어지는데, 이 값과 토크 값의 상관관계에 대한 교정(Calibration)으로부터 토크변환기^[13]에 작용되

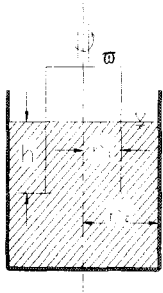
고 있는 정확한 토크 값이 구해지는 것이다

2.2 점도 측정계의 원리^{[4][5]}

본 연구에서 사용하는 점도 측정기는 원통이 회전할 때 액체와의 마찰로 인해 발생하는 선단 응력과 선단속도와의 관계로부터 구한다. 그림 2로부터 속도구배가 비례적인 관계를 갖는다는 뉴턴유동식의 가정 하에서 다음 식을 유도할 수 있다. 회전원통에 발생하는 전체토크를 T 라고 하면

$$T = T_1 + T_2 \quad (2)$$

이다. 외면에 작용하는 토크 T_1 과 내면에 작용하는 토크 T_2 는 같은 시료액에서 측정되므로 똑같은 점도 μ 를 갖는다. 따라서 토크 T_1 은 시료액이 직선적 속도구배를 갖는다는 조건으로 부터



r_1 : Radius of inner cylinder
 r_2 : Radius of outer cylinder
 h : Cylindrical height in a liquid
 ω : Angular velocity of rotating cylinder

Fig. 2 Rotational concentric viscometer

$$T_1 = \mu \left(\frac{du}{dr} \right) (2\pi r_1 h) r_1 = \mu \left(\frac{r_1 \omega}{a} \right) (2\pi r_1 h) r_1 \quad (3)$$

여기서 $\omega = 2\pi N/60$ 을 이용하면 식(3)은

$$T_1 = \mu \left(\frac{\pi^2 h r_1^3 N}{15a} \right) \quad (4)$$

이 된다. 그리고 회전원통의 두께가 회전원통의 반지름보다 아주 작다고 고려하면 ($t \ll r_1$) 두께를 무시할 수 있으므로, 내면에 작용하는 토크도 (3)식과 같이 직선적 속도구배로 가정하여 구하면

(5)식으로 쓸 수 있다.

$$T_2 = \mu \left(\frac{\pi^2 h r_1^2 N}{15} \right) \quad (5)$$

따라서 (2) 식과 (5) 식에 의해 전체의 토크 T 는

$$T = \frac{\pi^2 h r_1^2 N (r_1 + a)}{15a} \quad (6)$$

이고 점도 μ 는 다음과 같다.

$$\mu = \frac{15aT}{\pi^2 h r_1^2 (r_1 + a) N} \quad (7)$$

여기서

- u : 경계층 내의 속도[m/s]
- N : 회전원통의 회전수[r.p.m.]
- μ : 액체(시험액)의 점도[Pa · s]
- a : $r_2 - r_1$ [m]

마찬가지로 T 와 r, h, ω 도 MKS단위로 표현된다.

점도산출식 (7)에서 $\mu = k_2 T$ 로 하면 토크 T 는 (1)식으로부터 $e_o = k_1 T e_i$ 로 바꾼 식에 대입을 하면

$$e_o = \mu \frac{k_1}{k_2} e_i \quad (8)$$

이 유도된다. 따라서 (8)식에서 알 수 있듯이 토크 변환기는 점도계로서 점도측정을 전기량으로부터 구해 낼 수가 있다.

3. 측정방법 및 장치

본 실험에서 시료로는 공업용 실리콘 액체시료 1000cSt, 500cSt 두가지 종류의 시판품(市販品)을 사용하였으며 용기로는 반지름이 각각 다른 두 가지 회전원통을 사용하였다.

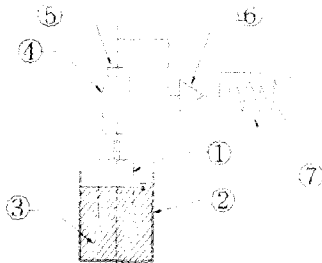


Fig. 3 Block-diagram of viscosity Measurement

Table 2 Name of parts on experimental equipment

No.	Name of parts
①	Inner cylindrical
②	Outer cylindrical
③	Sample(liquid)
④	Torque transducer
⑤	Slipring
⑥	Amplifier
⑦	Recorder

Fig. 3 은 실험장치의 구성을 간략하게 보여주며 Table 2에서 각 구성요소의 명칭을 표시하였다. 그리고 사진 1은 점도측정장치의 전경이다.

그림3으로부터 동심(同心)원통회전식 점도계의 점도산출 과정을 알아보면

- ① 안쪽 원통이 회전하면 액체의 점도 영향으로 토크변환기의 수감부에 토크 작용으로 저항변화가 발생한다.
- ② 이 신호를 슬립링(Slipring)을 통해 앰프(Amplifier)로 보내 증폭시킨다.
- ③ 기록기로 이 증폭된 스트레인 값(전기출력)을 보내어 기록한다.
- ④ 미리 교정된 스트레인값과 토크값의 상관



Photo. 1 View of viscosity measuring apparatus

관계(직선비례)로부터 얻고자 하는 토크값을 구한다.

⑤ 점도산출식(7)에 토크값을 대입해서 점도를 구한다.

4. 실험결과 및 고찰

식 (7)에서 보면 점도는 T/N 에 비례함을 알 수 있다. 즉, 똑같은 시료에 대해서는 점도 μ 가 같아야 한다. 그러므로 T/N 은 일정한 값을 이루어 비례해야 됨을 알 수 있다.

Fig.4 는 측정용 실리콘 1000cSt을 가지고 공심회전식 원통형 점도계(미소토크변환기)로서 점도를 측정하기 위하여 회전수를 80 r.p.m. 와 100 r.p.m. 두 가지로서 측정 데이터를 기록한 것이다. 2000 μ strain을 교정기준으로 감도를 설정한 결과 회전수 80에서는 약 440 μ strain, 100 에서는 840 μ strain 이다. 따라서, 약간의 편심(偏心)에도 감도가 크기 때문에 편심 파형이 크게 나타나서 중심선에서의 오차가 크게 나타난 것으로 생각되어진다.

Fig.4에서 보면 저 회전일수록 편심 파형이 심한 것은 유동마찰이 커서 생기는 힘(회전모우멘트)의 현상으로 사료된다.

500cSt는 1000cSt보다 편심이 작아서 이를 가지고 Fig. 4와 같은 실험 데이터를 통해서 정리한 것이 Fig. 5이다.

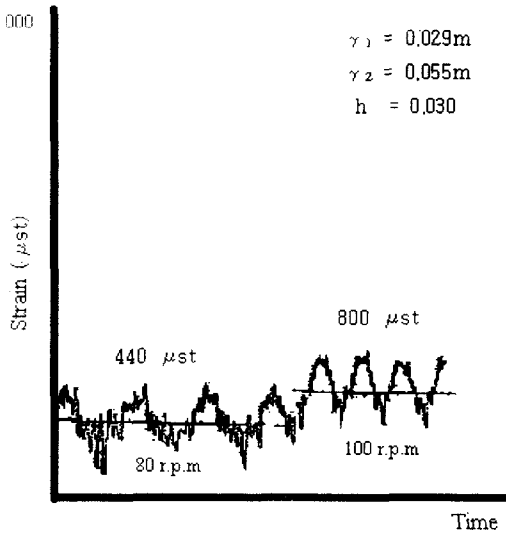


Fig. 4 Measurement row graph on the sample (Silicon:1000cSt)

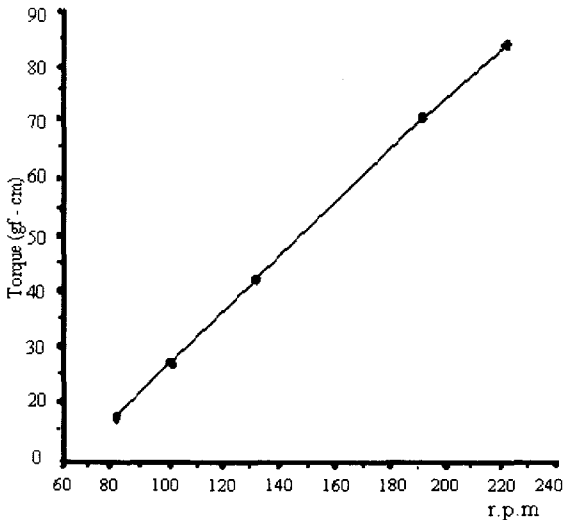


Fig. 5 Relational graph of torque vs. r.p.m

실제로 Fig.5 에서 보면 실험결과로부터 N 에 대한 T 가 비례함을 알 수 있다.

이 도표를 통해서 변환기로서 스트레인 값으로 토크값이 구해지고 토크와 스트레인 상관교정도표를 가지고 이론식에 적용하여 점도를 구한다.

다음으로 두 종류 모두 온도가 21℃의 실리콘 (동점도치 1000cSt, 500cSt)에 대해 회전속도

80r.p.m.에서 시료 액체중에 담긴 회전원통의 높이 $h=0.03$ m, $r_2=0.055$ m로 일정한 조건에서 $r_1=0.029$ m, $r_1=0.0375$ m인 각각 다른 회전원통을 사용하여 시료(실리콘)에 대한 점도를 측정 한 결과를 보면 다음 Table 3과 같다.

Table 3 comparison of torque & kinetic viscosity about rotating cylindrical with different radius in 80rpm

a:(mm) $r_1 - r_2$	Sample (Silicon) r_1 : Radius of cylinder (mm)	500cSt (514cSt)*		1000cSt (1158cSt)*	
		Torque (N·m)	Visco-sity (cSt)	Torque (N·m)	Visco-sity (cSt)
25	30	0.00125	464	0.00188	980
12	38	0.00353	525	0.00564	1093

Table 3 에서는 시판되는 실리콘 액체 500cSt(日製)와 1000cSt(국산)의 2가지 시료에 대하여 서로 다른 반지름의 동심회전원통 2가지 Model로서 80r.p.m.(80r.p.m.을 선택한 것은 50r.p.m.과 100 r.p.m. 중간 평균속도)에서 점도를 측정 한 결과이다

500cSt에 대해서는 원통 30mm(반지름)의 경우 결과는 464cSt이고, 원통 38mm에서는 결과치는 525 cSt였다. 그리고 1000 cSt 에서는 원통 30mm은 980 cSt, 원통 38mm에서는 1093 cSt로 산출되어 $r_2 - r_1 = a$ (외통과 내통간격)가 작은 쪽이 오차가 작은 것으로 나타났다.

표에서 (*)값은 표준연구원에서 교정된 값으로서 이 값을 가지고 검토하면 500cSt는 2% 정도이고 1000cSt는 4.5%의 오차 범위였다. 1000cSt 및 500cSt와 1000cSt를 혼합하여(적당히 임의 양을) 만든 약 670cSt을 각각 측정 한 결과는 1000cSt 및 670cSt는 거의 1.6%이내의 오차범위에 있어 측정기로 토크 측정값을 정확하게 측정하여 읽어낼 수 있다면 1%까지 정밀정확도를 유지 할 수가 있다고 생각된다.

Table 3으로부터 알 수 있는바와 같이 뉴턴유동에 대해서 회전원통의 내부, 외부의 흐름은 직선적 속도구배로 흐른다고 가정했던 점도 산출식은 비교적 시료에 대해 근사치로써 접근함을 확인할 수 있다. (뉴턴니안유동체). 따라서 일정한 보정계수를 구해 가지고 (구배계수) 점도 산출식에 적용하면 보다 정확한 점도 값을 얻을 수 있을 것으로 본다.

5. 결론

미소용량형 토크 변환기로서 점도를 측정할 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 점도 측정에 있어서 토크는 회전수와 거의 직선적인 관계에 있음을 확인하였다.
- 2) 측정된 토크를 이용하여 점도 산출식(이론식)으로부터 계산한 점도값은 시료에 대하여 비교적 근사한 값으로 계산되었다.
- 3) 두 원통사이의 간격이 작을수록 정확한 점도 값을 얻을 수 있음을 확인하였다.
- 4) 정확한 교정용 표준액을 가지고 미소토크 변환기로서 토크를 측정함으로써 현장에서 미지의 점도를 간편하고도 정확하게 측정할 수 있다고 본다.

앞으로 오차를 보다 작게 하기 위해서 중심축의 편심을 극소화하고, 보다 소형으로써 감도를 크게 올리면 기존의 음차식(진동감쇄식) 보다 정밀정확도 면에서 월등히 우수한 점도계를 국산화 할 수 있다고 생각된다.

후기

본 연구는 대림대학 학술 연구 지원금으로 수행되었습니다. 또한 본 실험에 있어 많은 도움을 주신 한양대학교 한응교 명예교수님과 한국항공대학교 김두만 교수님에게 감사드립니다.

참고문헌

1. 小野大重治, Rheology 要論, 模書店, P.45, 1957.
2. Freundlich, H., Juliusburger, F., "Troans. Faraday Soc.," Stain Gauge Readings, Vo.31, P.92, 1935.

3. Reynolds O "Phit Mag.," International Shipbuilding Progress, Vo. 8, P. 20, 1985.
4. Saal, R. N. J. Koens, G. J., "Inst. Petroleum," NACA Techn., Vo. 19, P. 176, 1933.
5. 김갑용, 김두만, "소용량형 토크 변환기 시작에 관한 실험적 연구," 자동차공학회, 제7권, 제1호, PP. 116~123, 1999.
6. Van Wazer, J. R., Lyons, J. W., Kin, K. Y., Colwell, R. E., Vinconity and flow mounuromont, John Wiley & Sons, New York, P. 326, 1963.
7. Krieger, I.M., Maron, S.H., J. Appl. Phys., Prentice Hall, P. 23, P. 147, 1952.
8. Maron, S. H., Krieger, I. M., Sisko, A. W., J. Appl. Phys., Prentice Hall, P. 25, P. 971, 1954.
9. Ubbelohde, L., "J. Inst. Petrol.," Scientific Instrument Plant, Vo.19, P.376, 1993.
10. Fitz-Simons, O., "Ind. Eng. Chem.," Anal. Ed., Vo. 7, P. 345, 1935.
11. Ruh, E. L., Walker, R. W. Dean, E. W., "Ind. Eny. Chem.," Anal. Ed., Vo. 13, P. 346, 1941.
12. 한응교, 스트레인게이지 응용과 이론, 보성문화사, PP. 225~229, 1970.
13. Green H., Industrial Rheology and Rheological Structures, John Willey & Sons New York, P. 235, 1949.
14. Couette, M. M., "Ann. Chin. et Phys.," Tras. S.A.E., Vo. 21, P. 433, 1890.
15. Reiner, M. Rivlin, R. S., "Kolloid-z 43," Scientific Instrument Plant, P.1, 1927.