

고분자량 점도지수향상제가 첨가된 오일의 음향점도 특성

공호성[†] · C.V. Ossia · 한흥구

한국과학기술연구원 에너지메카닉스연구센터

Acoustic Viscosity Characteristics of Oils with High Molecular Weight VI Improver Additives

H. Kong[†], C.V. Ossia and H.G. Han

Energy Mechanics Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul, Korea

(Received June 20, 2009; Accepted July 15, 2009)

Abstract – Oil viscosity is one of the important parameters for machinery condition monitoring. Basically, it is expressed as kinematic viscosity measured by capillary flow and dynamic or absolute viscosity measured by rotary shear viscometry. Recently, acoustic wave techniques appear in the market, measuring viscosity as the product of dynamic viscosity and density. For Newtonian fluids, knowledge of density allows conversion from one viscosity parameter to the other at a specific shear rate and temperature. In this work, oil samples with different chain lengths of viscosity index (VI) improvers and concentrations were examined by different viscometric techniques. Results showed that acoustic viscosity measurements give misleading results for oil samples with high molecular weight VI improvers and at low temperatures $\leq 40^\circ\text{C}$.

Key words – kinematic viscosity(동점도), absolute viscosity(절대점도), acoustic viscosity(음향점도), viscometer(점도계), VI additive(점도지수향상제)

1. 서 론

오일의 점도는 유체의 흐름에 저항함의 측정값으로서 상대 접촉운동을 하는 두 물체 사이의 하중을 지지하는 능력을 대변하는 매우 중요한 물성이다. 산업용 오일에서 점도의 증가는 산화, 먼지 또는 수분 혹은 높은 등급의 점도를 갖는 유체가 시스템에 오염되었음을 의미한다. 산업용 오일의 점도가 사용 중에 감소하는 경우는 흔치 않으나, 만약에 상기의 현상이 발생한다면 이는 솔벤트 성분이나 점도가 낮은 오일이 혼합되었음을 의미한다. 엔진유의 경우는 연료의 혼합에 의하여 점도의 두드러진 감소가 야기될 수 있다. 일반적으로 대상 윤활유의 점도가 정상적인 등급에 비하여 10% 이상이하로 변하면, 통상적으로 윤활유 공급자는 오일을

교환하도록 하고 있으므로, 이를 기준으로 윤활유의 점도 변화를 정량적으로 측정하고 관리하고 있다[1-3].

점도의 크기는 오일이 중력을 받아 일정한 크기의 모세관을 통과하는데 소요되는 시간을 기준으로 하는 동점도(kinematic viscosity) 측정방법(ASTM D445)이 과거에는 일반적으로 사용되었던 반면에, 최근 들어서는 상용화된 대다수의 점도측정 기기에서는 절대점도/역학점도(absolute/dynamic viscosity) 혹은 음향점도(acoustic viscosity)를 기준으로 측정하고 있음을 볼 수 있다(Table 1 참조).

절대점도는 펌프나 가압 공기 등과 같이 외부로부터 오일에 힘을 주었을 때 오일이 흐름에 저항하는 값(ASTM D4624)에 의해서, 혹은 오일 내에서 모터로 스피들을 구동했을 때 유체를 통하여 발생하는 힘의 크기(예; Brookfield rotary method, ASTM D2983)를

[†]주저자 · 책임저자 : hkong@kist.re.kr

Table 1. Viscometers available in the market.

Company Name	Technology/Method							Measurement Output	
	Acoustic	Rotational	Electromagnetic	Falling ball	Vibrational	Torsional	Other	Absolute viscosity	Kinematic viscosity
BiODE, Inc.	O							O	
Brookfield Engineering Laboratories, Inc.		O						O	
Cambridge Viscosity, Inc.			O					O	O
Duratech, Inc.				O				O	
Galvanic Applied Sciences USA, Inc.					O				O
Mansco Products, Inc.						O			
Norcross Corporation							O	O	
PAD Peripheral Advanced Design Inc.					O			O	
Razaghi Meyer International	O							O	O
Sofraser SA								O	O
Symyx Technologies, Inc.						O	O	O	
TD Collaborative LLC								O	
Vindum Engineering, Inc.								O	

기준으로서 측정된다. 절대점도를 측정하는 센서는 상기 방법 이외에도 다양한 형태의 진동소자를 이용하는 방법[4]들이 등장하고 있으며, 산업현장에서의 인라인 적용을 위한 소형화 센서들도 점차적으로 등장하고 있는 추세이다. Newtonian 유체를 가정할 경우, 동점도는 절대점도를 대상 유체의 밀도로 나눈 값으로 표시된다.

$$\text{동점도}(\nu) = \frac{\text{절대점도}(\eta)}{\text{밀도}(\rho)} \tag{1}$$

음향점도계로 측정하는 음향점도(acoustic viscosity)는 유체를 여기하여 발생하는 압축파 전달 특성을 측정함에 기초하고 있다[5]. 최근 들어 SAW(Surface Acoustic Wave)를 사용하는 마이크로 음향센서가 등장하여 유체의 다양한 물리적 특성들을 측정하는 센서로서 많이 사용되고 있어서, 유전율이나 전기전도도와 같은 전기적 물성이나, 밀도, 점도와 같은 기계적 물성, 그리고 유체 내에 소량 존재할 수 있는 화학적 물질의 존재들을 측정하고 있다. 특히 음향파장 에너지의 전달, 반사 및 소멸에 기반을 둔 solid-state 센서가 현재 가장 각광을 받고 있는데, 상기 방법의 물리적인 측정

방법은 특징적인 물질임피던스 ($Z_w=(\rho_w\mu)^{1/2}$)를 갖는 고체 음파안내체(waveguide)로부터 인접한 유체 (임피던스 $Z_L=(\omega\rho_L\eta)^{1/2}$)로의 음형 전달과 에너지의 전달에 기반을 두고 있다. 이 때 ρ_w 는 음파안내체 물질의 밀도, ρ_L 는 유체의 밀도, μ 는 고체 파장안내체의 shear elastic modulus, ω 는 파장의 주파수, 그리고 η 는 절대 점도를 의미한다. $Z_L \ll Z_w$ 의 경우 에너지 전달은 Z_L/Z_w 의 비율에 비례하며, 상기 파워손실의 제공근은 주파수, 밀도 및 점도의 곱($\omega\rho\eta$)에 비례하는 것으로 알려져 있다. 따라서 주파수가 일정한 경우, 점도와 밀도의 곱의 양이 측정할 수 있으며, 상기의 값을 음향 점도(acoustic viscosity, AV)로 정의하고 있다. 이 때 동점도는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\text{동점도}(\nu) = \frac{\text{음향점도}(\rho \cdot \eta)}{\text{밀도}(\rho)^2} \tag{2}$$

산업 현장에 실시간 및 in-situ로 적용할 수 있는 측정센서로서 적당한 기기가 되기 위하여는 정확성, 우수한 반복성과 응답성을 지녀야 함이 요구된다. 또한 어려운 환경 조건하에서도 측정작업을 수행 할 수 있어야 하며 경제적으로 저가야 함은 물론이고 운반성

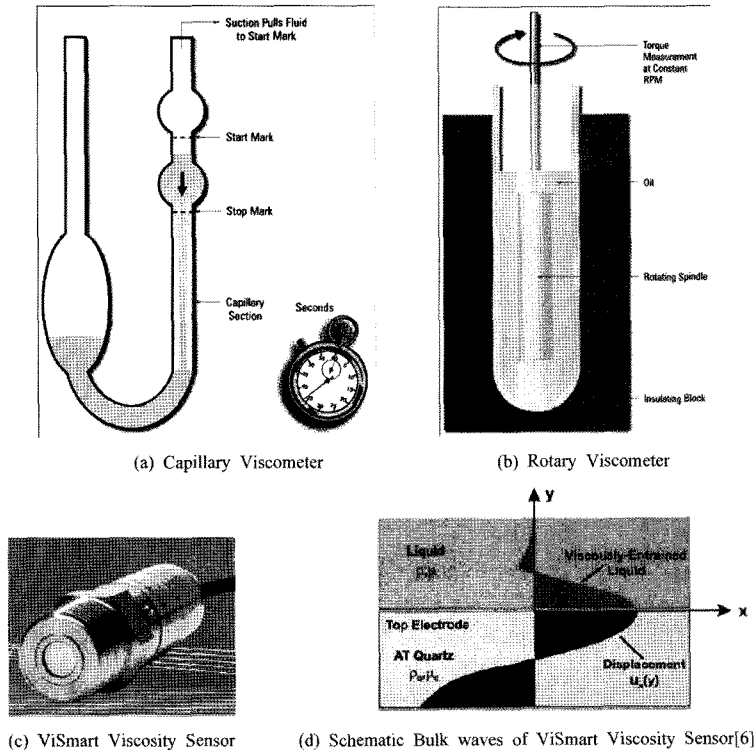


Fig. 1. Viscosity sensors used in this work (a) capillary viscometer, (b) rotary viscometer and (c) vismart viscosity sensor, (d) schematic bulk waves of vismart low shear bolt sensor.

(portability)이 병행된다면 바람직 할 것이다. 이와 같은 측면에서 볼 때, 최근 시장에 새롭게 등장하고 있는 음향점도계는 센서 개발자들이 선호할만한 적지 않은 장점들을 지니고 있는 것으로 사료된다.

이와 같이 다양한 원리를 이용하여 오일의 점도를 측정하는 센서들이 산업 현장에서 활용됨에 따라서 이들 센서로부터 측정되는 결과들 상호간의 호환성이 중요한 관심 사항이 되고 있다. 유통개소에 동일한 종류의 점도 측정센서를 사용한 측정값으로서 점도 변화 트렌드를 모니터링 하는 경우가 가장 이상적이라고 할 수 있다. 그러나 현실적으로 여러 종류의 점도계를 병행하여 사용하여야 하는 경우도 있으며, 오일의 동점도 값을 기준으로 한 과거로부터의 전통적 관리기준(표준) 때문에 절대점도 혹은 음향점도를 측정하는 센서들의 경우 측정값을 동점도로 환산하는 과정에서 여러 가지 에러들이 발생할 소지가 적지 않다.

본 연구에서는 점도지수 향상제가 함유되어 있는 오일 시료를 유리 세관을 이용한 점도계(Capillary Viscometer), 회전식 점도계(Rotary Viscometer) 및 음향점도계로 각각 측정하고 상기 결과를 비교/분석함으로써, 센서

종류에 따른 점도측정 결과들을 세부적으로 살펴보고자 하였다.

2. 오일 시료 및 점도측정 센서

본 시험에 사용한 오일은 PAO6 합성유(polyalphaolefin, Exxon Mobil)이며, 상기 기유에 분자량 크기가 각기 다른 총 4종류의 PMMA(polymethylmethacrylate, Sanyo chemical)계 점도지수향상제(Viscosity Index Improver)를 3종류의 중량비 농도비율로서 첨가하였다. 점도지수향상제의 분자량은 GPC(Gel Permeation Chromatography, HLC-8320GPC)로 측정하였다.

오일의 점도 측정에 사용한 점도계는 동점도를 측정하는 Cannon-Fenske 모세관 점도계(Capillary Viscometer, ASTM D445), 절대점도를 측정하는 회전식 전단 점도계(Rotary Shear Viscometry, physica MCR-301, Anton paar), 그리고 음향점도를 측정하는 ViSmart Viscosity Sensor(Low Shear Bolt Viscosity Sensor type, SenGe-nuity)가 사용되었다.

Fig. 1는 사용된 점도계 형식의 개괄적인 모습들을

Table 2. Kinematic viscosity measured by a capillary viscometer

Capillary Viscometer (ASTM D445)					
kinematic viscosity (v, cST) at 40°C					
	M _w	C=0%	C=3%	C=6%	C=9%
PMMA-1	40,311	30.40	34.18	38.16	42.62
PMMA-2	60,795	30.40	33.40	37.14	41.78
PMMA-3	155,259	30.40	34.40	39.04	44.55
PMMA-4	530,537	30.40	33.31	37.16	42.42
kinematic viscosity (v, cST) at 100°C					
	M _w	C=0%	C=3%	C=6%	C=9%
PMMA-1	40,311	5.98	6.68	7.54	8.47
PMMA-2	60,795	5.98	6.68	7.54	8.60
PMMA-3	155,259	5.98	7.04	8.34	9.94
PMMA-4	530,537	5.98	7.15	8.67	10.50

M_w: molecular weight, C: Concentration of VI additive

보이고 있다. 본 시험에 사용한 음향점도계 ViSmart Viscosity는 Fig. 1(d)에서와 같이 Bulk Acoustic Wave(BAW)를 사용하는 센서이다.

3. 시험 결과 및 분석

Table 2는 PAO6 기유에 무게평균분자량 크기가 각기 다른 총 4종류의 PMMA계 점도지수향상제를 3종류의 중량비 농도비율로서 첨가한 오일 시료들의 동점도를 오일 온도 40°C 및 100°C에서 Cannon-Fenske Viscometer로서 측정 한 결과이다.

온도 100°C에서의 경우에 분자량 크기에 따라 동점도가 선형적으로 증가하였으며, Fig. 2와 같이 동일한 점도지수향상제 분자량 조건에서는 농도가 갈수록 오

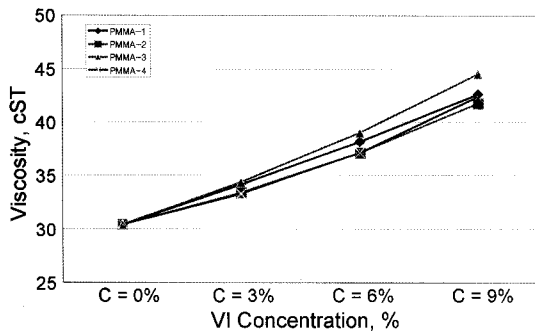


Fig. 2. Kinematic Viscosity @40°C measured by Capillary Viscometer.

Table 3. VI of test oils (calculated by reference [7] method)

Concentration, %	PMMA-1	PMMA-2	PMMA-3	PMMA-4
0	147	147	147	147
3	156	161	172	186
6	170	176	197	223
9	181	190	219	249

일 시료의 동점도가 증가함을 볼 수 있다.

Table 3은 상기 시료들의 viscosity Index (VI)값이다. 40°C 및 100°C 이외의 온도 조건에서의 동점도는 아래와 같은 ASTM D341[8]에 의한 보외법(extrapolation)으로 구할 수 있다.

$$\log(\log(\nu+0.7))=A-B*\log(T+273) \quad (3)$$

(A, B는 상수)

Fig. 3은 점도지수향상제 첨가량이 9%인 시료들의 온도 변화(20, 40, 100°C)에 따른 동점도 측정결과의 비교하여 나타낸 것이다. 상대적으로 낮은 온도(40°C) 이하에서는 점도지수향상제가 오일 시료의 점도에 미치는 영향이 그다지 크지 않음을 알 수 있다. 스프링 형태로 뭉쳐있다고 알려진 점도지수향상제(Fig. 4 참조)가 저온에서는 오일 매체와의 상호작용이 적게 발생함으로써 오일의 점도에 미치는 영향이 적게 나타난 결과로 사료된다.

Table 4는 Rotary Shear Viscometer를 이용하여 점

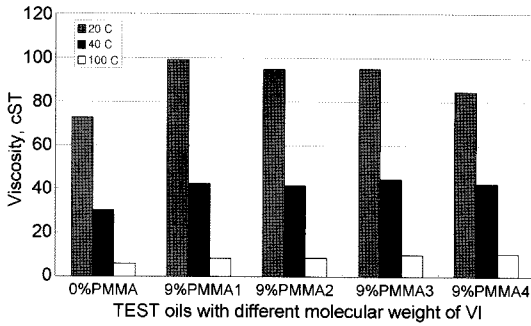


Fig. 3. Kinematic viscosity of test oils with different molecular weight of VI additive versus the temperature.

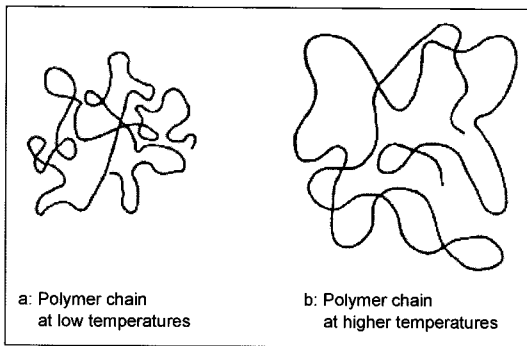


Fig. 4. Physical structure of VI improver in oil.

Table 4. Absolute viscosity measured by rotary shear viscometer

Temp.(°C)	Absolute Viscosity η , [cP]				
	0%PMM A	9%PMM A-1	9%PMM A-2	9%PMM A-3	9%PMM A-4
20	59.90	82.30	79.55	83.60	76.80
25	47.40	65.70	-	67.05	62.05
30	38.35	53.45	51.40	54.55	50.70
35	31.25	43.90	-	44.85	42.05
40	25.70	36.50	35.35	37.45	35.45

도지수향상제 첨가량이 9%인 시료들의 온도 40°C 하에서의 시료 오일들의 절대점도 측정 결과이다. 상기 결과는 최소 2회 이상의 측정값들을 평균하여 얻은 것이다.

상기 절대점도로부터 동점도값을 얻기 위하여 온도 변화에 따른 시료 오일의 밀도를 알아야 한다. 오일 밀도는 액체비중계(hydrometer, ASTM D891A)를 사용하여 측정하였으며, Fig. 5와 같다.

기타 온도 조건에서의 밀도는 아래와 같은 수식에

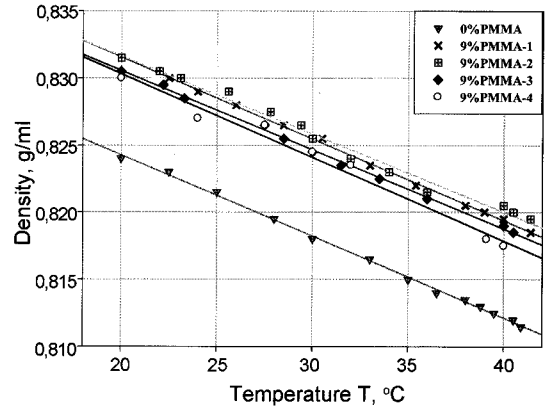


Fig. 5. Density of test oils with the temperature.

Table 5. Equivalent kinematic viscosity from rotary shear viscometer.

Temp.(°C)	Equivalent kinematic viscosity $v=\eta/\rho$, [cST]				
	0%PMM A	9%PMM A-1	9%PMM A-2	9%PMM A-3	9%PMM A-4
20	72.66	98.95	95.70	100.67	92.44
25	57.70	79.28	-	81.04	74.96
30	46.86	64.73	62.28	66.17	61.47
35	38.32	53.36	-	54.60	51.17
40	31.63	44.53	43.15	45.76	43.30

의한 보외법(extrapolation)으로 구할 수 있다.

$$\rho = AT + B \quad (A, B \text{는 상수}) \quad (4)$$

점도지수향상제를 함유하고 있지 않은 기유 시료의 경우, $A = -0.0006$, $B = 0.8364$ 를 얻을 수 있다. 시료 오일의 밀도 측정 결과를 이용하여 Table 4에서의 오일 시료들의 동점도는 Table 5에서와 같이 계산된다.

상기 Table 5 결과에서 온도 40°C의 측정값들을 Cannon-Fenske Viscometer로 측정된 오일 동점도값들과 비교하면 측정센서의 종류가 서로 다르고 각기 다른 전단 응력 조건임에도 불구하고 매우 유사한 동점도 측정값을 보이고 있음을 알 수 있다.

한편 Table 6는 시험 오일 시료들의 점도를 오일 온도 40°C에서 ViSmart 센서로서 측정된 결과이다.

Table 7 및 Fig. 6은 수식(2)를 이용하여 Table 6에서의 음향점도 측정값을 시료 오일의 밀도의 제곱으로 나누어 동점도를 구한 결과이다.

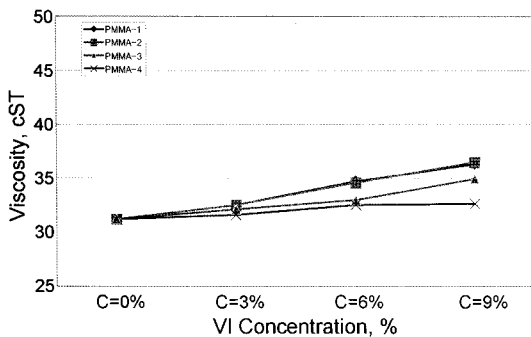
상기 Fig. 6 결과에서 온도 40°C의 측정값들을 Cannon-Fenske Viscometer로 측정된 오일 동점도값

Table 6. Acoustic viscosity at 40°C measured by ViSmart sensor

	Acoustic Viscosity(AV) @ 40°C				
	M _w	C=0%	C=3%	C=6%	C=9%
PMMA-1	40,311	20.60	21.60	23.20	24.40
PMMA-2	60,795	20.60	21.60	23.10	24.50
PMMA-3	155,259	20.60	21.30	22.00	23.40
PMMA-4	530,537	20.60	21.98	21.70	21.90

Table 7. Equivalent kinematic viscosity at 40°C from ViSmart sensor

	Equivalent kinematic viscosity $v=AV/\rho^2$, [cST] @ 40°C				
	M _w	C=0%	C=3%	C=6%	C=9%
PMMA-1	40,311	31.21	32.53	34.73	36.31
PMMA-2	60,795	31.21	32.54	34.61	36.50
PMMA-3	155,259	31.21	32.11	33.01	34.94
PMMA-4	530,537	31.21	31.62	32.54	32.67

**Fig. 6. Equivalent kinematic viscosity @ 40°C from ViSmart sensor.**

(Fig. 2)들과 비교하면 분명하게 차이가 있음을 알 수 있다. 점도지수향상제가 함유되지 않은 기유의 경우에는 측정센서에서의 측정값이 상호 유사하였으나, 점도지수향상제의 함유량이 크고 첨가제의 분자량이 상대적으로 커질수록 음향점도계의 측정값에서의 측정값 오류도 증가하는 것을 알 수 있었다.

이와 같은 경향은 상대적으로 저온(40°C) 하에서 스프링 형태로 뭉쳐있다고 알려진 점도지수향상제가 저온에서는 오일 매체와의 상호작용이 적게 발생함으로써 오일의 점도에 미치는 영향이 적게 나타난 결과로 사료되며, acoustic wave 전달특성을 측정하여 유체의 음향점도를 평가하는 점도측정센서를 사용할 경우에 매우 유의해야 할 사항임을 알 수 있었다.

4. 결 론

유리 세관을 통과하는 Capillary 점도계, 회전식 점도계 및 음향점도계를 이용하여 점도지수향상제가 함유되어 있는 오일들의 점도를 측정하고 비교한 결과에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 점도지수향상제의 분자량이 크고 첨가 농도가 클수록 오일 시료의 동점도가 증가하였다.

2) 상대적으로 저온(40°C) 하에서는 스프링 형태로 뭉쳐있다고 알려진 점도지수향상제가 오일 매체와의 상호작용이 적게 발생함으로써 오일의 점도에 미치는 영향이 적게 나타난다.

3) Cannon-Fenske Viscometer로 측정한 오일의 절대점도를 밀도로 나누어 동점도 값을 구한 결과와 Capillary viscometer에서 측정한 동점도 값들은 측정센서의 종류가 서로 다르고 각기 다른 전단응력 조건임에도 불구하고 매우 유사한 동점도 측정값을 보이고 있음을 알 수 있다.

4) 음향점도계로 측정한 음향점도로부터 구한 동점도값과 Cannon-Fenske Viscometer로 측정한 오일 동점도값들을 비교한 결과에서, 점도지수향상제가 함유되지 않은 기유의 경우에는 측정센서에서의 측정값이 상호 유사하였으나, 점도지수향상제의 함유량이 크고 첨가제의 분자량이 상대적으로 커질수록 음향점도계의 측정값에서의 측정값 오류도 증가하는 것을 알 수 있었다. 따라서 acoustic wave 전달특성을 측정하여 유체의 음향점도를 평가하는 점도측정센서를 사용할 경우에 매우 유의해야 할 사항임을 알 수 있었다.

참고 문헌

1. 공호성, “윤활관리기법을 이용한 설비상태진단 및 진단기술”, 소음진동(Journal of kSNVE), Vol. 17, No. 3, pp. 26-30, 2007.
2. 공호성의, “기계 상태진단을 위한 인-라인형 오일 모니터링 스마트 센서”, 한국윤활학회, Vol. 24, No. 3, pp. 111-121, 2008.
3. ISO/DIS 14830-1, “Condition Monitoring and Diagnostics of Machine - Tribology-based Monitoring and Diagnostics-, Part 1: General guidelines”, 2001.
4. Hidekazu TAI, Jyouji SEKI, Takuro KIDA and Tsutomu KOBAYASHI, “Vibration-type Viscometer Using a Triangular Bimorph Transducer—measurement of high viscosity by low-frequency operation—”, Japanese J. of Applied Physics, Vol. 43, No. 5B, pp. 3088-3089, 2004.

5. KEREM DURDAG and JEFF ANDLE, "Real-time Viscosity Measurement for Condition-based Monitoring Using Solid-state Viscosity Sensor", *Tribology Transactions*, Vol. 51, pp. 296-302, 2008.
6. ViSmart™ Low Shear Bolt Viscosity Sensor Manual, published by SenGenuity (2009).
7. ASTM D 2270-04, "Standard Practice for Calculating Viscosity Index from Kinematic Viscosity at 40 and 100°C".
8. ASTM D341-03, "Standard Test Method for Viscosity-Temperature Charts for Liquid Petroleum Products".