

# 液體의 粘性이 펌핑시스템에 미치는 影響

(Liquid Viscosity Effects on Pumping System) 제 1 부

Gilbert F. Carlson

(Fellow ASHRAE)

(ASHRAE JOURNAL July 1974 p 39 ~ 44)

金 皓 永\* 譯

앞으로는 시스템을 設計하는 技術者들은 물이 아닌 다른 液體의 펌핑문제를 빈번하게 다루게 될 것이며, 시스템 設計에서 에너지 보존 問題에 直面하게 될 것이다. 現在 技術者들은 파이프시스템, 밸브와 이음, 제어밸브와 터미널 유니트와, 펌프 등에서 液體의 粘性이 水頭損失(壓力강하)에 미치는 基本的인 相關關係들에 基礎를 두고 水頭損失을 計算하는데 大部分의 時間을 소비하고 있는 실정이다. 그러므로 뒤에 나오는 基本圖表를 使用하여 위의 目的을 쉽게 達成하는 方法을 알아보기로 하겠다.

지금 이 論文에서는 물을 使用할 때의 水頭損失을 修正함으로써 粘性液體의 水頭損失을 計算하는데 適合한 方法과 現在 使用되는 方法의 相關關係를 論하려고 한다. 물의 水頭損失資料는 Darcy-Weisbach 式에 基礎를 둔 管치수 決定圖表, 制御밸브  $C_v$ , 流量計矯正曲線 등에서 얻을 수 있고 펌프 그리고 시스템에서 使用되는 어느 裝置에서 그리고 물에 對한 流動水頭損失의 正確한 關係식이 세워진 裝置들에서 얻을 수 있다.

「하나의 特定한 粘性으로 指定된 물의 流動水頭損失圖表에는 必要한 모든 값들이 포함되어 있다. 即 레이놀즈數, 마찰계수, 速度等으로서 이들에 依하여 다른 粘性을 가진 液體에 對하여 간편한 修正을 할 수 있는 것이다.」

이러한 點을 보여주기 爲하여 파이프치수의 決定(流動水頭) 圖表는 Darcy-Weisbach 式에 基礎를 두어야 한다. 即

$$\Delta h = Ft \cdot \text{Liquid Hd.} = f \frac{L}{D} \times \frac{V^2}{2g}$$

$f$ 는 마찰계수로서 레이놀즈數( $N_{Re}$ )의 함수이며  $f$ 와  $N_{Re}$ 의 關係는 Moody 線圖(1972 ASHRAE Handbook of Fundamentals, Chapter

4, Figure 14, Page 87)에 가장 간단하게 기술되어 있다. Moody의 線圖에서는 마찰계수  $f$ 는 파이프 치수와 함께 레이놀즈數에 의하여 변질되는 것이 明確하게 나타나 있다. 그때 流體의 粘性은 動粘性係數로 表示되며 레이놀즈數  $N_{Re}$ 는 다음처럼 定義된다.

$$N_{Re} = \frac{VD}{\nu}$$

여기서  $D$ 는 파이프직경이며 레이놀즈數는 流體速度에 따라 직접적으로 변화하며 動粘性係數  $\nu$ 에 반비례 한다. 파이프 流動水頭損失圖表는 速度 또는 GPM에 따라 변하는  $N_{Re}$ 와 動粘性係數( $60^\circ \text{H}_2\text{O} = 1.1 \text{ Centistoke}$ )에 基礎를 두고 그려지며 파이프치수 決定은 流體의 速度의 변화에 따라서 유도된다.

위의 關係로부터 파이프치수 決定圖表는 一般的으로  $60^\circ \text{F}$ 의 물(粘性 1.1 Centistoke)의 粘性을 基本으로 하여 이루어진다. 또 레이놀즈數는 流體의 비례속도 즉 파이프의 치수 또는 GPM에 依해서 決定된다. 이러한 點으로 미루어 보아 마찰계수는 Moody 圖表에 의하여 決定되며 水頭損失은 Darcy-Weisbach의 式에 나타난 마찰계수에 依하여 최종적으로 決定된다.

\* 正會員, 高大理工大

파이프 치수를 결정하는 水頭損失圖表의 作成에 使用된 方法을 따랐다면 그려진 各點 自體內에 비록 보이지는 않으나, 作圖에 必要한  $N_{Re}$ 와 마찰계수가 들어 있어야만 한다는 것에 首肯이 갈 수 있다. 어떤 잘 만들어진 圖表에 對해서 우리는 그 節次를 逆行시켜서 어떤 點들 그리고 모든 點들에 對한 마찰係數와  $N_{Re}$ 를 決定할 수 있고, 實際적으로 그 圖表上에 Moody의 關係를 다시 그릴 수 있다.

잘 만들어진 배관유동수두손실도 표상에 Moody의 關係를, 水頭損失을 修正하게 만든 粘性에 對해서, 다시 그릴 수 있다 하더라도 그 圖表는 理解하기 힘든 복잡한 것이 될 것이며 外間法(extrapolation)의 必要는 適用精度를 떨어뜨릴 것이다. 이 圖表에는 Moody의 關係들을 포함하여야 한다는 사실은 作圖하지 않은 때라 하더라도 배관수두손실에 주는 粘性의 影響을 確定하는 아주 간단하지만 精確한 方法을 내보내 준다. 그 節次 단계와 문제를 目標로한 한 질차내의 各 단계에 對하여 特定例를 들어 다음에 說明하고자 한다. 粘性이 4.4Centistoke인 液體가 1"의 관을 8GPM으로 흐르는 100ft 당 水頭損失을 計算해 보기로 한다. 基本條件(1.1 Centistoke)에서 水頭損失은 100ft 당 4.5ft이다. 그 例에서 해설을 爲하여 粘性이 1.1 Centistoke(60°F 때의 물)의 물의 流動에 基礎를 둔 파이프치수決定用 水頭損失圖表의 골격을 참고로 하며 사용해 본다.

제 1 단계 : 設計流量에 比 1.1을 곱하고 Centistoke의 粘性으로 나눈다. 이것으로 粘性評價流量이 얻어진다. 粘性評價流量은

$$8\text{gpm} \times \frac{1.1}{4.4} = 2\text{gpm}$$

註釋 : 레이놀즈數  $N_{Re}$ 의 公式를 보면 1.1 Centistoke의 粘性때 2gpm의 流量때나 4.4 Centistoke의 8gpm의 流量때나 같은 레이놀즈數를 갖는다. 이 단계에는 設計하려는 流體의 粘性과 流量은 궁극적으로는 基本圖表의 條件(1.1 Centistoke)의 流量(flow rate)과 等價의 값을 갖는다.

제 2 단계 : 流動狀態 즉 층류나 난류나를 設定

하고 基本圖表로부터 粘性評價流量에 따라 基本水頭損失을 決定한다. 그림 1로부터

a) 1" 파이프를 2gpm의 流量으로 흐를 때 0.379'/100'의 水頭損失을 갖는다.

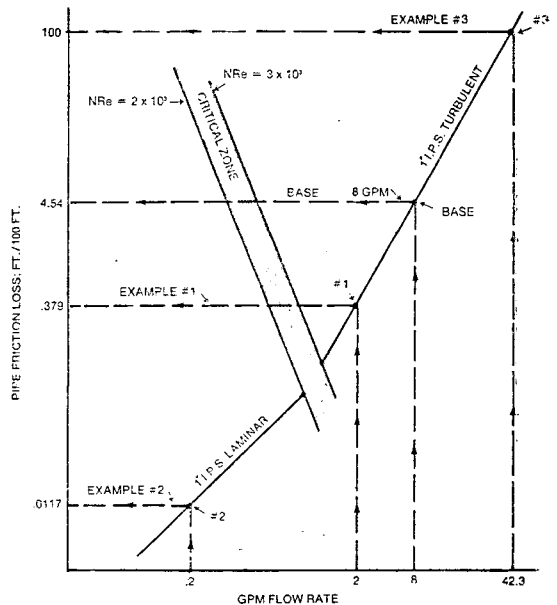
b) 레이놀즈數가  $3 \times 10^3$  이상인 한계영역 위에서 流量 2gpm과 1" 파이프가 교차하므로 난류이다.

註釋 :

a) 1"파이프때 2gpm과 1.1 Centistoke의 粘性을 갖는 流體의 레이놀즈數와 마찰계수는 지금 計算하려는 條件(8gpm 4.4 Centistoke)의 그것들과 같음이 틀림 없다. 1" 파이프에 2gpm의 流量에 對應하는 速度와 마찰계수의 關係式 Darcy-Weisbach式으로부터 水頭損失은 100ft당 0.379ft로 유도된다.

b) 그림 1에 나타난 것과 같이 2gpm, 1.1 Centistoke에서의  $N_{Re}$ 는 計算하려는 條件의  $N_{Re}$ 와 等價이므로 8gpm, 4.6 Centistoke에서도 난류일 것이다.

제 3 단계 : 粘性流體의 水頭損失은 基本水頭損失(제 2 단계)에다 粘性評價流量과 計算하려는 流量의 比의 제곱을 곱해서 계산된다.



층류유동 때의 水頭損失의 例

1" 파이프의 4.4 Centistoke의 粘性 8gpm의 流量일 때의 水頭損失 =  $0.379' / 100' \times (\frac{2}{8})^2 = 6.06' / 100'$

註釋 : Darcy-Weisbach 식은 마찰계수가 一定할 때 어떤 파이프의 수두손실은 단지 速度變化의 供給에 對한 函數이다. 1.1 Centistoke 2gpm 때의 마찰계수와 레이놀즈數가 一定할 때는 4.4 Centistoke의 粘性일 때 流量은 8gpm으로 증가한다.

총류 流動時 높은 粘性을 갖는 流體에서의 水頭損失은 위와 같은 方法으로 計算한다. 예를 들면 4.4 Centistoke의 粘性을 갖는 流體가 1" 파이프를 通하여 8gpm으로 흐를 때 水頭損失은

제 1 단계 :

$$\text{粘性評價流量} = 8\text{gpm} \times \frac{1.1}{4.4} = 0.2\text{gpm}$$

제 2 단계 : 0.2gpm의 流動條件과 基本水頭損失의 決定.

a) 그림 1로부터 基本水頭損失은 100ft 당 0.0117ft 이다.

b) 流動은 총류이다.

제 3 단계 : 4.4 Centistoke의 粘性流體가 1" 파이프를 通하여 흐를 때에 실제 水頭損失의 決定.

$$0.0117' / 100' \times (\frac{8}{12})^2 = 18.7' / 100'$$

### 낮은 粘性流體의 例

위의 方法과 基本圖表는 1.1 Centistoke의 粘性보다 작은 粘性을 가진 流體의 水頭損失을 豫測할 때에도 역시 使用된다. 예를 들면 300°F의 물이 1"의 파이프를 通하여 8gpm으로 흐를 때 100ft 당 水頭損失은? 단 300°F의 粘性은 0.208 Centistoke 이다.

제 1 단계 : 粘性評價流量

$$8\text{gpm} \times \frac{1.1}{0.208} = 42.3\text{gpm}$$

제 2 단계 : 流動條件과 基本水頭損失의 決定;

a) 그림 1로부터 基本水頭損失은 100' / 100'

b) 流動은 난류

제 3 단계 : 실제 유동의 水頭損失;

$$100' / 100' \times (\frac{8}{42.3})^2 = 3.58' / 100'$$

基本粘性 條件下에서 파이프 두께의 변화(안지름)가 水頭損失에 미치는 影響.

<방법 1> 어떤 주어진 流量에서 파이프의 水頭損失은 內徑의 變化의 5승으로 變化한다. 이 結論은 아래와 같이 Darcy-Weisbach 式에 基礎를 두고 있다.

$$\frac{\Delta h_n}{f_n \frac{L}{D_n} \frac{V_n^2}{2g}} = \frac{\Delta h_b}{f_b \frac{L}{D_b} \frac{V_b^2}{2g}}$$

이때 n은 새로운 파이프의 內徑의 첨자, b는 基本파이프의 內徑의 첨자이다.

어떤 一定 流量에서 速度는 面積( $\pi D^2/4$ )으로 流量을 나눈 것과 같다. 위의 式에 代入하고 생략하면

$$\Delta h_n = \Delta h_b \frac{f_n}{f_b} \left(\frac{D_b}{D_n}\right)^5$$

이 關係式을 알면 우리는 파이프의 基本內徑에서부터 內徑이 變換한 것 때문에 일어난 水頭損失의 變化를 구할 수 있다. 우리는 마찰계수가 일정할 때만은 5승의 內徑의 變化의 修正이 正確하게 맞기 때문에 水頭損失의 變化를 구할 수 있을 뿐이다. 마찰계수는 일정한 流動量의 가정하에서 같을( $f_n = f_b$ ) 수 없다. 內徑의 變化라는 것은 速度 및 레이놀즈數의 變化를 가져오는 要因이 되며 레이놀즈數의 變化는 Moody의 修正値에서 보면 마찰계수를 變化시킨다. 또 파이프 직徑의 變化는 마찰계수에 의해서 수정된 Moody의 圖表에 보여주는 것과 같이 조도직徑비  $e/D$ 의 變化를 가져온다. 다행히도 마찰계수의 變化는 基本파이프 直徑로부터 나오는 수정치의 5% 정도 이내에서 있으므로 5승의 직徑변화의 수정치에서 생략하는 경향이 있다. 오차는 한계영역에서 最大가 되며 큰 레이놀즈數에서는 소멸되며, 또 基本內徑보다 작은 內徑의 파이프에서 水頭損失에 미치는 修正値에서는 과장表現되며 반대의 경우에는 아주 미세하게 나타난다.

파이프內徑 즉 5승의 內徑(ID)의 값을 나타낸

圖表는 基本圖表를 포함하여 基本條件과 다른 內徑을 갖는 파이프의 水頭損失을 求하는데 使用된다.

**<방법 2>**

基本圖表는 log-log 의 눈금으로 되어 있으므로 基本以外的 파이프의 內徑에 對한 曲線을 log-log 방안지로 얻을 수 있다. 예를 들면 計算자의 C 스케일은 이러한 目的을 위해서 使用된다. 가운데 눈금자를 基本曲線에 놓고 相應하는 log 內徑과 교차시키면 새로운 파이프內徑의 水頭損失曲線을 구성하는 點들을 얻게 된다.

새로 그린 log 눈금이 垂直線으로부터 基本曲線으로 기울 때는 작은 크기의 正確性的 偏差가 發生한다. 이 點들은 正確하게 수직일이 틀림없다. 이러한 때문에 새로 그린 log 눈금이, 垂直으로 大部分 거의 그러지게 하는 基本圖表에 包含된다. 그러면 別途의 한 종이를, 基本內徑, 다음으로 最大의, 그리고 다음으로 작은 內徑이라고 表示할 수 있다. 基本以外的 다른 파이프內徑에 對한 水頭損失曲線이 주어진다면 우리는 이미 개설된 절차에 의하여 粘性의 變化에 따른 影響을 평가할 수 있다.

**배관수두손실에 주는 파이프內徑수와 粘性變化의 複合影響에 對한 5승의 수정.**

지금까지 說明한 節次는 粘性和 파이프內徑과 粘性의 變化가 水頭損失에 미치는 基本條件에 對한 相對的인 複合的 影響을 고려하기 爲해서는 조금 修正할 必要가 있을 뿐이다. 實際上으로 배관의 수두손실이 지름의 變化의 5제곱에 따라 變化하는 事實을 감안하기 爲한 또하나의 段階를 紹介하고자 한다.

예를 들면 #5의 스텐레스스틸 파이프를 通하여 4.4 Centistoke의 粘性을 가진 流體가 8gpm으로 흐를 때 水頭損失은? 이 境遇 基本(內徑 40IPS) 파이프는 內徑이 1.049"이며  $1.049^5 = 1.270$  이고 #5의 스텐레스스틸 파이프의 內徑은 1.185"

이므로  $1.185^5 = 2.337$ 이다.

제 1 단계 : 점성평가유량

$$8\text{gpm} \times \frac{1.1}{4.4} = 2\text{gpm}$$

제 2 단계 : 基本水頭損失과 流動條件은

a) 그림 1로부터 基本水頭損失은 0.379'

b) 流動條件은 分명한 亂流流動

제 3 단계 : 內徑의 變化에 따른 修正基本水頭損失

修正基本水頭損失 = 基本水頭損失

$$\times \frac{D^5(\text{기본파이프})}{D^5(\text{새로운파이프})} = 0.379' \times \frac{1.270}{2.337} = 0.206' / 100'$$

제 4 단계 : 實際水頭損失

實際水頭損失 = 修正基本水頭損失

$$\times \left( \frac{\text{設計流量}}{\text{粘性評價流量}} \right)^2 = 0.206 \times \left( \frac{8}{2} \right)^2 = 3.3' / 100'$$

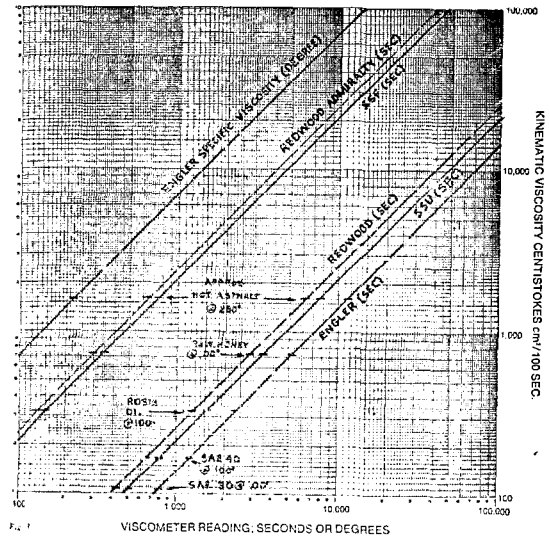
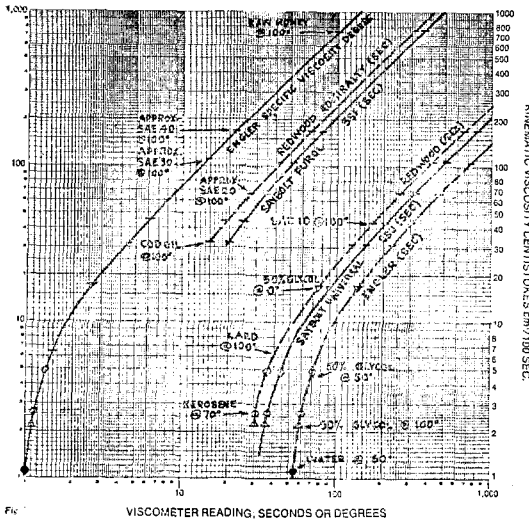
이 說明된 節次들은 簡便하며 또 어떤 粘性의 液體와 어느 파이프의 內徑에서 水頭損失을 精確하게 求하는데 使用될 수 있다. 같은 基本節次를 使用해서 파이프의 이음, 제어밸브, 銅배관等에서의 粘性流體의 水頭損失을 求할수 있다. 파이프, 配管, 제어밸브와 펌프의 성능곡선에 粘性이 미치는 影響등을 求하는 基本圖表들도 可能하다.

또 流體의 粘性評價圖表의 使用은 Centistoke로 表示한 動粘性係數의 使用에 따라 달라진다는 것을 注意하게 된다.

粘性은 多樣한 형태로 表示된다. 앞서 보여준 간단한 方法들은 粘性으로 起因한 水頭損失變化의 算定에 使用할 것이라면 시스템設計者들은 어떤 可能한 粘性의 定義라도 Centistoke로 表示한 動粘性係로 換算할 수 있다는 것은 매우 重要한 일이다. 다음에 나오는 것은 粘性의 換算에 關한 것들이다.

**粘性의 Centistoke 換算**

絕對流體粘性은 流動의 內部抵抗 即 전단응력을 나타내고 있다. 粘性이 크다는 것은 流動에서 抵抗이 크다는 것이며 絕對流體粘性은 다음 單位로 表現된다.



$$\begin{aligned} \text{미터계 單位} &= \frac{\text{Dyne Sec.}^*}{\text{cm}^2} = \frac{\text{Gram}^{**}}{\text{cm Sec.}} \\ &= \text{Poise}; \text{Centipoise} = \frac{\text{Poise}}{100} \end{aligned}$$

$$\text{영국절대단위} = \frac{\text{Pdl Sec}^*}{\text{Ft}^2} = \frac{\text{Lb.}^{**}}{\text{Ft. Sec.}}$$

$$\text{영국중력단위} = \frac{\text{Lb. Sec}^*}{\text{Ft}^2} = \frac{\text{Slug}^{**}}{\text{Ft. Sec.}}$$

레이놀즈數는 物理的 性質의 無次元의 數이며 流動의 水頭損失에 直接的인 影響을 미치는 數이다. 이 關係들은 아래와 같다. 파이프에 使用될 때

$$N_{Re} = \frac{\rho V d}{\mu}$$

$\rho$ : 밀도  $\mu$ : 絶對粘性係數  $V$ : 流體速度  
 $D$ : 파이프의 직경.

특히 레이놀즈數를 올바르게 算定하고자 한다면 各 單位는 一貫性있는 값들을 使用해야 한다는 것을 알아야 한다. 即, 英國重力單位라면 이와 같은 모든 單位等等이다.

레이놀즈數의 式에는 밀도와 絶對粘性을 包含하고 있고 바로 이 事實은 또다른 粘性의 定義를 許用한다. 即 動粘性係數이다. 動粘性係數는 絶

表 1. 粘性의 Centistoke 換算\*\* 可能한 項

絶對粘性係數				動粘性係數		
Centipoise	Poise	英 絶對 單位	英 重 力 單位	Centistoke	英 單 位	Stoke
$\frac{\text{Dyne sec}}{100\text{cm}^2}$	$\frac{\text{Dyne sec}}{\text{cm}^2}$	$\frac{\text{Pal sec}}{\text{Ft}^2}$	$\frac{\text{lb sec}}{\text{Ft}^2}$	$\frac{\text{cm}^2}{100 \text{ sec}}$	$\frac{\text{cm}^2}{\text{sec}}$	$\frac{\text{Ft}^2}{\text{sec}}$
$\frac{\text{Gram}}{100\text{cm sec}}$	$\frac{\text{Gram}}{\text{cm sec}}$	$\frac{\text{lb}^{***}}{\text{Ft sec}}$	$\frac{\text{Slug}}{\text{Ft sec}}$			
$\frac{1}{\text{S. G.}^*}$	$\frac{100}{\text{S. G.}}$	$\frac{1488}{\text{S. G.}}$	$\frac{47.88}{\text{S. G.}}$	1	100	$9.29 \times 10^4$

\* S. G. = 유체비중량

\* 힘, 길이 시간 (F-L-T) 차원계

\* 질량, 길이 시간 (M-L-T) 차원계

\*\* 위의 可能한 各項에 數值를 곱해서 Centistokes의 動粘性係數를 얻음.

\*\*\* 粘性項은 lb/ft<sup>3</sup>sec/Hr 로 나타난다. 36sec/Hr 일 때 환산항은  $\frac{1488}{3600} \times \text{S. G.}$  혹은  $\frac{1}{2.42} \times \text{S. G.}$  로 변환한다.

對粘性을 밀도로 나눈 값일 뿐 이것은 레이놀즈數의 式을 아래와 같이 修正해주는 아주 有用한 數이다.

$$N_{Re} = \frac{Vd}{\nu}$$

$\nu$ : 動粘性係數

動粘性係數는 SSU 와 같은 粘性計에서 測定되는 값이다. 粘性計에서 測定한 粘性은 바로 레이놀즈數의 關係式에 직접 代入할 수 없고 이를 使用할 수 있는 單位 即 미터系나 英國系 單位들로 바꾸어야 한다. 動粘性係數의 單位項은 二次元系로 아래와 같다.

$$\text{미터계 動粘性係數} = \frac{\text{Sq cm}}{\text{Sec}} = \text{Stokes};$$

$$\frac{\text{Stokes}}{100} = \text{Centistoke}$$

$$\text{英國系 動粘性係數} = \frac{\text{Ft}^2}{\text{Sec}}$$

여기서의 論議는 미터계로 指定한 粘性 그리고 Centistoke 單位의 粘性에 基礎를 두고 있다. 그 理由는 우리들이 標準實用水頭損失(파이프 損失, C, 항등) 係數가 60°F의 물에 基礎를 두었고 또 60°F의 물의 動粘性係數가 約 1 Centistoke (실제값은 1.1 Centistoke)이기 때문이다.

Centistoke의 使用으로 實用可能한 물使用의 資料를, 다른 液體의 粘性으로 惹起되는 달라진 水頭損失條件으로 簡單히 修正하는 것이 可能하다.

基本的인 問題는 液體의 粘性의 單位를 Centistoke로 變換하는 것이다. 먼저 말한 바처럼 粘性에 對한 內容은 혼란을 일으킬 만큼 여러가지 형태로 나타난다. 粘性은 다음에 나오는 內容을

잘 적용할 것이라면 Centistoke로 올바르게 變換시킴이 아주 重要하다. 定하여진 粘性單位들이라는 것은 絕對粘性 아니면 動粘性 그리고 그들의 수치 即 物理的인 單位의 表示로서 미터계, 英國 重力單位系, 英國絕對單位系들로서 알아볼 수 있고 表 1을 보아 그것들을 Centistoke로 變換할 수 있다.

먼저 말한 바와 같이 動粘性은 一般的으로 粘性計에서 測定되며 이것은 간단하고 信賴性있는 方法이다. 世界도처에서 使用되는 粘性計는 여러가지 形態가 있다.

北美에서는 Saybolt Universal 粘性計를 粘性의 測定에 一般的으로 使用하며 粘性은 SSU로 나타낸다. 또 높은 粘性일 때는 Saybolt Furol 粘性計를 使用하며 SSF 초로 나타낸다. (연료나 윤활유에 使用)

Redwood 粘性計는 英國에서 使用되며 두가지 형태가 있다. Redwood No. 1은 낮은 粘性和 Redwood Admiralty는 높은 粘性에서 使用되며 測定値는 초로 나타낸다.

유럽大陸에서는 Engler 粘性計가 使用되며 눈금은 낮은 粘性일 때는 Engler 초를 使用하며 Engler 度는 높은 粘性의 流體에 使用한다.

위에 기술한 粘性計 눈금들은 각각 Centistoke로 表示된 動粘性係數와 관련을 가진 公式들이다. 이들의 關係式들은 보여주는 것 보다는 차라리 曲線으로 Centistoke와의 關係를 나타냄이 더 간단하다. 이 曲線은 또한 使用者를 爲하여 그리고 液體粘性을 볼 수 있도록 하기 爲하여 여러가지 普遍的인 液體의 粘性들을 나타내어 주기도 한다.