

윤활기술



윤활유의 특성과 성능시험(II)

서울工大 명예教授  
 한국 윤활학회 고문  
 月刊 機械設計, 月刊 工業材料發行人  
 兼 편집人  
 鄭 善 謨

[1] 潤滑油의 粘度特性

1) 壓力變化에 의한 粘度特性

모든 潤滑油는 加壓되면 粘度가 增加한다. 하 이테의 研究에 의하면 16000 lb/m<sup>2</sup> 정도의 高壓

下에서는 鑛油의 粘度는 常壓時의 약 10배로 증 가하고, 植物油는 약 4배 정도밖에 增加하지 않 는다고 論술하고 있다. 또, 1~2[ton/m<sup>2</sup>]의 壓 力下에서 脂肪油의 粘度는 거의 變化하지 않 으 나 鑛油는 10~100% 정도의 增加가 인정되고 있 다.

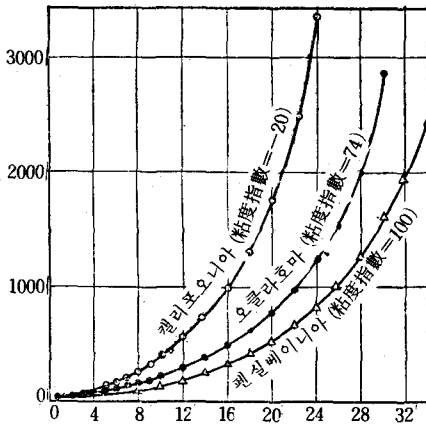


그림 12

鑛油의 潤滑油는 그 組成成分에 의하여 壓力 變化에 의한 粘度變化特性이 다르고, 그림 12에 서 보는 것처럼 粘度指數가 큰 펜실베이니아系 油가 壓力의 影響을 적게 받는다.

한편 脂肪油 및 鑛油에 대하여 2000kg/cm<sup>2</sup>에 이 르기까지 각 壓力 및 0~156℃의 온도에 대하여 粘度測定을 한 결과, 어느 온도에 있어서도 壓力 과 粘度사이에는 다음 관계가 성립되는 것을 확 인하였다.

$$\eta_p = \eta e^{\alpha p} \dots\dots\dots(26)$$

다만,  $\eta_p$ : 壓力P에 있어서의 절대점도[cp]

$\eta$ : 常溫에 있어서의 절대점도[cp]

$\alpha$ : 윤활유의 종류에 의한 壓力係數로서 보통 0.001~0.005의 범위내에 있다.

위의  $\alpha$ 의 값은 鑛油일수록 크고, 지방유일수록 작게 되며, 그 差는 常溫일수록 크고 高溫일수록 上昇함에 따라 점차 작게 되는 것으로 알려 졌다.

그리고  $\alpha$ 는 溫度에 따라 變化하는 것으로서 다 음 관계가 있다.

$$\alpha = \alpha_0 e^{\beta/T} \dots\dots\dots(27)$$

여기서  $\alpha_0$ : 기준으로 잡는 온도에 있어서의 壓

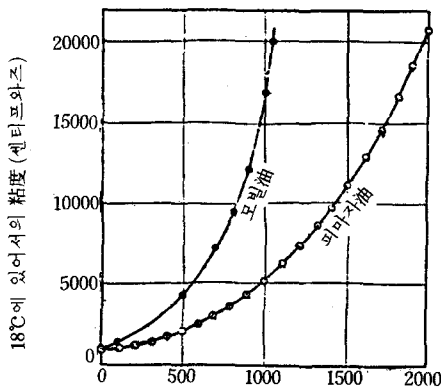


그림 13 壓力 (kg/cm<sup>2</sup>)

力係數

$T$  : 절대온도  $(273+t)^\circ[C]$

$\beta$  : 윤활유의 종류에 의한 常數로서 鑛油에서 1000정도의 값을 취한다.

$\beta$ 의 값은 지방유에서는 일반적으로 작고 約 700~900정도이며, 鑛油는 일반적으로 크다.

溫度가 높게 되면 지방유와 광유의 粘度의 압력에 依한 변화의 差는 차차로 減少되는 것은 앞의 式에서 알 수가 있다.

2) 粘度比重常數

潤滑油의 比重은 同一粘度에 대해서는 파라핀系 成分이 풍부할수록 작고, 나프텐系 成分이 풍부할수록 크다. 따라서 同一粘度라고 볼 수 있는 같은 商標의 제품에 대해서는 比重을 측정함으로써 어느 정도의 管理, 選擇 및 成分 組成을 추정할 수가 있으나, 점도가 다르고 종류가 다른 潤滑油에 대해서는 比重만으로는 구별할 수 없게 된다.

Bill은 각종 鑛油의 比重과 粘度와의 관계를 연구하고  $37.8^\circ C$ 의 기름에 있어서 Saybolt 粘度와  $d(\frac{60}{60}^\circ F)$ 의 비중  $S$ 와의 사이에는 다음 관계가 있다는 것을 발표하였다.

$$\alpha = \frac{10S - 1.0752 \log(\eta_s - 38)}{10 - \log(\eta_s - 38)} \dots\dots\dots (28)$$

단,  $\alpha$  : 粘度比重常數

$S$  : 比重 ( $60/60^\circ F$ )

$\eta_s$  : 세이보올트 粘度 (sec),  $37.8^\circ C$

粘度比重常數  $\alpha$  (VGC : viscosity gravity constant)는 鑛油의 化學組成을 표시하는 목표로 쓰이며, 이 값이 클수록 나프텐系 成分이 풍부하고 이 값이 작을수록 파라핀系 成分이 풍부하다는 것을 표시한다. 또, 가령 粘度 및 比重이 다른 기름이라 할지라도 이들에서 구한 VGC의 값이 같은 값이 되면, 같은 종류의 化學組成으로 되고 同種의 原油에서 정제되었다고 볼 수 있다.

지금 각종 鑛油에 대하여 粘度比重常數와 粘度指數를 각각 측정한 결과 表 5와 그림 14과 같이 된다. 즉, 粘度比重常數의 감소에 따라 粘度指數는 상승하는 것을 알 수 있다.

또, 粘度比重常數의 계산은  $98.9^\circ C$ 의 세이보올트 粘度와  $60^\circ F$ 의 기름에서 구할 수 있다.

表 5 粘度比重常數

試料油	粘度比重常數	粘度指數
試油番號 1	0.847	69.3
試油番號 2	0.871	32.3
試油番號 3	0.841	81.8
試油番號 5	0.872	32.1
試油番號 6	0.866	44.0
試油番號 8	0.829	89.1
試油番號 11	0.8126	96.4
試油番號 12	0.8122	95.7
試油番號 13	0.8150	93.6
Pennsylvania系油	0.8067	100
Gulf-Coast系油	0.8883	0

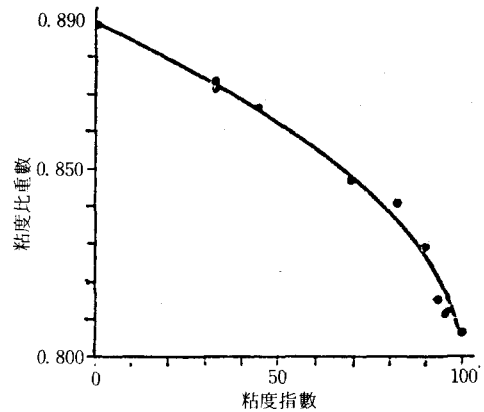


그림 14 VI와 VGC의 관계

$$\alpha' = S - 0.022 \log(\eta_s' - 35.5) \dots\dots\dots (29)$$

다만,  $\alpha'$  : 세이보올트 粘度 [sec],  $98.9^\circ C$

$S$  : 比重 ( $60/60^\circ F$ )

그리고  $\alpha$ 와  $\alpha'$ 사이에는 다음 관계식이 成立된다.

$$\alpha' = 0.24 + 0.755\alpha \dots\dots\dots (30)$$

(2) 潤滑油의 油性特性

1) 油性的 定義

粘度의 견지에서 설명할 수 없는 減摩作用을 油性이라 하며, 油分子의 金屬面에 대한 吸着力, 親和性的 強弱이 油性的 良否를 좌우한다. 油性은 潤滑狀態가 境界潤滑 (最小油膜 두께  $h$ 가  $10^{-4}$

~10<sup>-5</sup>mm정도)에 있을 경우의境界摩擦係數(靜止摩擦係數)를 사용하여 다음 식으로 표시한다.

$$\text{油性} = 100 - (\text{境界摩擦係數} \times 100) \dots\dots\dots(31)$$

油性은 過去는 粘性和 비슷하게 생각했으나 지금은 엄격히 구별하고 있다. 粘性은 物理的바탕으로 해석되는 것이나 油性은 化學的 바탕으로 定立되는 것이다. 油性은 潤滑유의 化學的 成分 구성에 의한 油膜의 構成力의 強弱의 強度를 표시하는 性質인 것이다.

2) 油膜構成力과 分子構造

일반적으로 機械의 摩擦面은 完全潤滑을 행할 수 있도록 設計되어 있으나, 摩擦速度와 荷重 사이에 調和를 이루지 못할 경우에는 상당히 두꺼운 두께로써 油層을 생기게 하는 것은 어렵고, 기름은 매우 얇은 膜으로 되어 不完全潤滑狀態로 된다. 조화가 잘 이루어지지 못할 경우에는 機械의 起動, 休止, 荷重이 아주 크게 될 때, 기름의 供給이 不充分할 때 등이다.

이와 같은 경우도 金屬이 직접 서로 접촉하는 것을 防止하고, 機械의 損傷, 摩擦抵抗의 減少를 도모하기 위해서는 潤滑油의 얇은 膜을 摩擦面에 강하게 吸着하도록 해야 하며, 이 얇은 膜을 구성하는 性能을 油性 또는 油膜構成力(oilness)이라 한다.

油膜構成力은 分子構造와 밀접한 관계가 있으며, 液體成分인 分子内の 活性原子團이 金屬의 分子와 化合하여 壓力에 의하여 破壞시키기 어려운 半固體油狀의 강한 얇은 膜을 생기게 한다. 活性原子團으로는 水酸基(OH), 카르복시基(COOH), 그 밖에 NO<sub>2</sub>, CN, COOM, COOR, NH<sub>2</sub>, WHCH<sub>3</sub>, NCS, COR, CHO등이 있다.

실제로 그 原子團들을 가지고 있는 化合物은 油性이 아주 크며, 有極性 化合物이라 한다. 예를 들면, 카르복시基를 가지고 있는 分子式이 C<sub>17</sub>H<sub>33</sub>COOH인 올레酸은 活性原子團을 가지고 있지 않는 炭水素로 된 鑛物油에 비하면 그 油性이 엄청나게 크다.

油活性에 관해서는 최근 여러 방향으로 계속 연구되고 있으나, X線을 이용하여 有極性 分子가 어떠한 排列를 하는가에 대한 브리의 研究에 의하면 活性原子團을 가진 有極性分子는 活性原

子團을 金屬面에 접하여 그림 15에서 보는 것처럼 直立平行狀態로 排列되고 있는 것으로 생각된다. 그림 15의 (1)은 에스테르, (2)는 飽和脂肪酸, (3)은 鹽素化한 脂肪酸 또는 에스테르의 排列狀態이고, 그림에서 작은 點은 活性原子團을 圖示하며, 그 주위의 圓은 그 原子團의 結合力的 力場을 표시하고 있다. 이것으로써 鹽素化된 脂肪酸 및 에스테르는 에스테르 金屬面에 대한 吸着力이 가장 강한 것을 알 수 있다.

그리고 (1)의 경우는 分子의 活性團을 그다지 강하지 않으나, (2) 및 (3)의 경우는 각각 活性團의 親和力에 의해 結合하여 複分子層을 이루므로 그림에서와 같이 滑動力이 존재하나, (1)의 경우에는 존재하지 않는 것으로 생각된다.

3) 油性和 濕潤熱

活性原子團을 가지고 있는 油分子가 金屬面과의 分子力이 서로 中和를 일으키기 때문에 생기며, 濕潤된 金屬의 全面積에 比例하고 일반적으로 液體分子가 金屬에 吸着될 때의 吸着力에 거의 正比例한다.

따라서 이 濕潤熱의 大小를 측정함으로써 油性의 大小를 알 수 있다. 바하만 및 프리이젤은

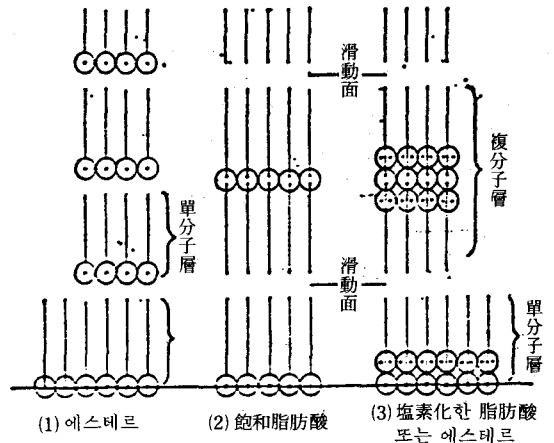


그림 15 活性原子團의 排列

銅粉100g에 대한 각종 기름의 50% 벤젠 溶液의 濕潤熱을 측정한 결과 피마자油는 12.1, 鑛油는 5.7, 鑛油에 올레酸1%를 첨가한 것은 21.3으로

서 油性이 풍부한 기름은 濕潤熱도 아주 크다는 것을 알 수 있었다.

한편 油性이 큰 기름은 물과 접촉하면 乳濁液(emulsion)을 만들기 쉽다. 또, 위에서 말한 바와 같은 活性原子團은 金屬을 腐蝕시킬 罣려가 있는데, 예를 들면 카르복시基를 포함한 化合物은 鐵을 부식하는 성질이 있다. 따라서 潤滑油로서는 機械에 따라서 油活性이 가장 적당한 것을 選定하지 않으면 안된다.

4) 油性測定法

潤滑油의 油性測定에는 振子式, 四球式 등 여러 가지가 있다.

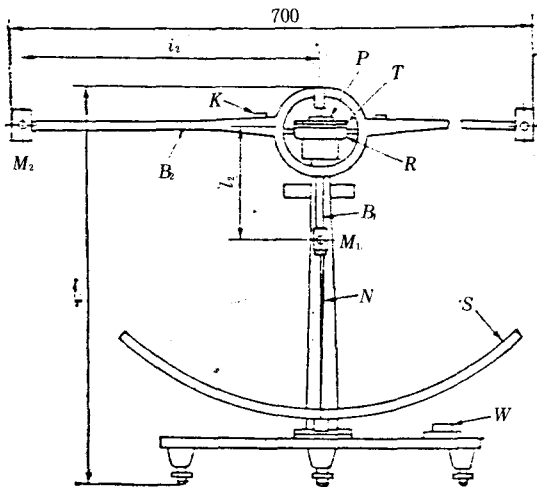


그림 16 振子式 油性試驗器

(1) 振子式 油性測定法

그림 16에 圖示한 바와 같은 간단한 振子式 油性試驗器에 있어서 시험기의 上部中央에 小形의 軸과 로울링 베어링을 기름에 담근 것같이 부착하고, 相對的으로 摩擦面壓 7.5~15ton/cm<sup>2</sup>의 極壓荷重을 걸고 境界潤滑狀態로 하여 그 때의 摩擦係數  $\mu$ 를 다음 식으로 구한다.

$$\text{油活性} = 100 - \mu \times 100 \dots\dots\dots (32)$$

(2) 摩擦係數 測定法

그림 17은 Deely 摩擦試驗器이며, 그림 18은 Deely 摩擦係數 測定裝置의 斷面圖로서 접시(皿)

① 위에 잘 닦아진 베어링 메탈 ②를 설치하고, ①에 試料油를 넣는다. ②의 위에는 錘 ⑤를 받치는 로울러의 圓板 ③이 있는데, 이것은 3개의 핀 ④에 의하여 ②에 접촉되어 있다. 마찰은 핀 ④와 ② 사이에서 일어나며, ③은 위쪽에 있는 베어링 ⑥, 스프링 ⑦ 및 指針盤 ⑧에 연결되어 있다. 지금 기어 ⑩에 달린 핸들 ⑨를 회전시키면 기어 ⑪ 및 이것에 固定된 ①은 回轉을 시작하며, 그와 동시에 ②가 돌아감으로써 ③도 핀 ④와 ② 사이의 摩擦 때문에 스프링 ⑦의 힘에 反抗하여 어느 角度만큼 돌아간다. 이 회전된 정도는 指針盤 ⑧의 指針에 의하여 지시된다.

그런데 어느 極限으로 되면 ②와 ③의 핀 ④는 미끄러져 나가려고 하는데, 이때 指針이 가리킨 눈금은 最大値가 되고 미끄럼을 계속하면 그

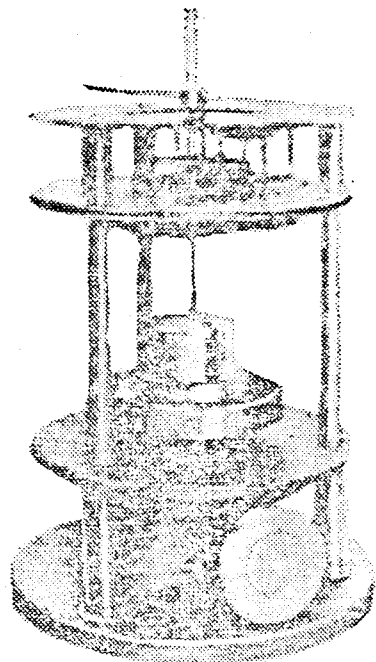


그림 17 Deely 摩擦試驗器

값은 低下한다. 그 最大値에 의하여 起動할 때 스프링 ⑦에 걸리는 힘, 즉 摩擦抵抗力 F가 표시되고, 또 ③의 핀 ④에 걸리는 壓力 N은 錘 ⑤에 의하여 알 수 있으므로, 이때의 靜止摩擦係數  $\mu$ 는  $\mu = F / N$ 으로 구할 수 있다.

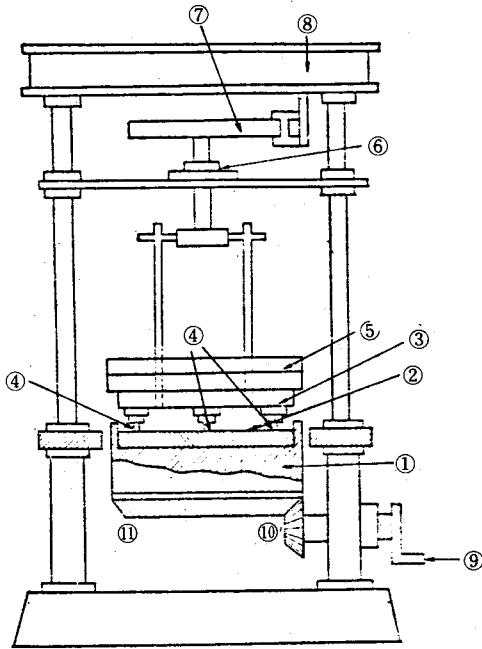


그림18 Deely摩擦係數測定裝置의 斷面圖

5) 概略數值

보통의 潤滑油는 84~88 정도의 값으로 되고, 그 폭은 약간에 지나지 않는다.

6) 影響

油性은 摩擦面이 境界潤滑狀態로 되기 쉬운 部分, 예를 들면 실린더壁, 球 및 로울러 베어링, 터어빈 베어링 등의 潤滑에 필요한 성질이며, 기름속에 다음 성분이 많이 포함되어 있을수록 油性이 向上된다.

- i) 파라핀系 成分
- ii) 래커 (油溶性 슬러지)
- iii) 動植物油
- iv) 油性向上劑

油性은 粘度와 같이 기름에 의하여 결정되는 것이 아니고, 다음 여러가지 原因에 의하여 그 값이 다르다.

- i) 溫度의 高低
- ii) 劣化의 程度
- iii) 기름의 品質
- iv) 摩擦面 金屬의 種類

油性和 각 因子와의 關係를 圖示하면 그림 19 와 같다.

潤滑油의 性質중에서 중요한 粘度와 油性과의 關係를 종합하면 表 6에서 보는 바와 같이 되는데, 兩者는 近似하기도 하고 서로 相反되기도 하여 一貫된 關聯性을 발견하기는 곤란하다.

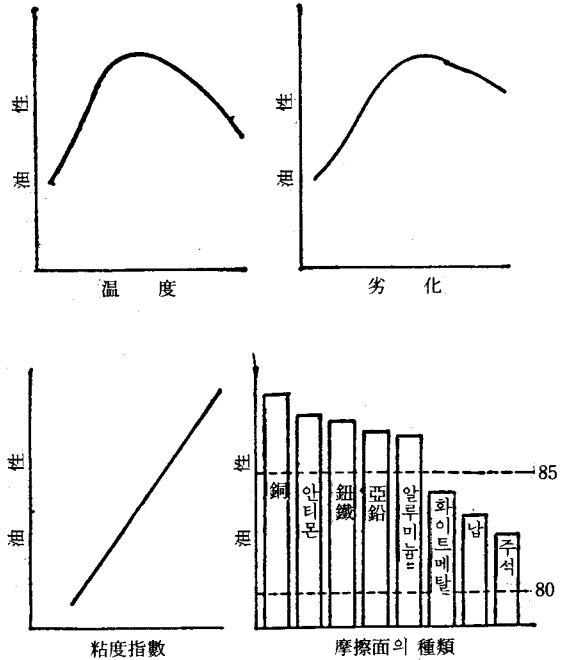


그림19 油性和 각 因子와의 關係

表 6 潤滑油의 粘度와 油性과의 關係

項 目	粘 度	油 性
流體潤滑	重 要	不 要
境界潤滑	不 要	重 要
潤滑油의組成	파라핀系일수록 粘度指數가크다	파라핀系일수록 良好함
溫 度	逆 比 例	比例에서逆比例
劣化 程度	比 例	比例에서逆比例
摩擦面金屬	無 關 係	매우관계가크다
摩擦係數	比 例	反 比 例

[3] 潤滑油의 表面特性

1) 表面張力

潤滑理論은 중래의 流體力學의 研究로써 여러 가지로 解析할 수 있으나, 境界潤滑의 범위에서

는 流體力學的으로 설명할 수 없고, 오일리니스(oiliness)로서 解析하게 되었다. 특히 乳化(emulsion)와 氣泡(foaming)는 이 오일리니스의 表面現象에 속하는 것이다.

流體의 각 分子는 相互의 吸引力으로 均衡을 잡고 있다. 그러나 液體의 表面上에서는 인접한 分子가 없으므로, 液體表面은 항상 안쪽으로 잡아 당겨지고 있다. 따라서 液體는 항상 表面積을 작게 하는 性質을 가지고 있으므로 液滴으로 되는데, 液體의 이와 같은 張力을 表面張力(surface tension)이라 한다. 그리고 潤滑油 및 潤滑油의 分子量에 가까운 炭化水素의 表面張力은 表 7에서 보는 바와 같이 대체로 두자리의 dyn/cm 單位로 표시된다.

表 7 遊離脂肪酸 含有鑛油 및 油脂類의 滴粒數와 比界面張力과의 關係

鑛油 및 油脂	遊離脂肪酸 含有率 (%)	滴粒數	比界面張力
鑛油	0	101	100
鑛油와 市販脂肪酸의 混合油	1.9	125	80
橄欖油	2.2	125	80
菜種油	2.5	132	76
椰子油	4.1	148	68
中性橄欖油	0.1	110	92
中性菜種油	0.15	108	93

分子吸引力이 다른 것을 포함하는 化合物의 경우에는 分子吸引力이 강한 化合物은 중심에 모이므로 吸引力이 약한 것, 즉 프리 에너지(Free energy)가 작은 것이 液體의 표면에 모여 表面張力이 低下한다.

潤滑油는 각종 化合物의 混合物로서, 새 그릇에 옮길 때 프리 에너지가 작은 것은 表面에 移動하기 때문에 시간이 걸리므로, 그림 20에서 보는 것처럼 時間的으로 表面張力은 바뀌어져서 결국은 均衡을 이루게 된다.

따라서 潤滑油의 表面張力을 정확히 측정하려면, 그릇에 옮기고 나서 平衡에 도달한 후에 측정해야 된다.

이상과 같이 表面層에 프리 에너지가 작은 成分이 모이는 것을 吸着이라 하는데, 이것은 모든 界面에 일어나는 現象이다.

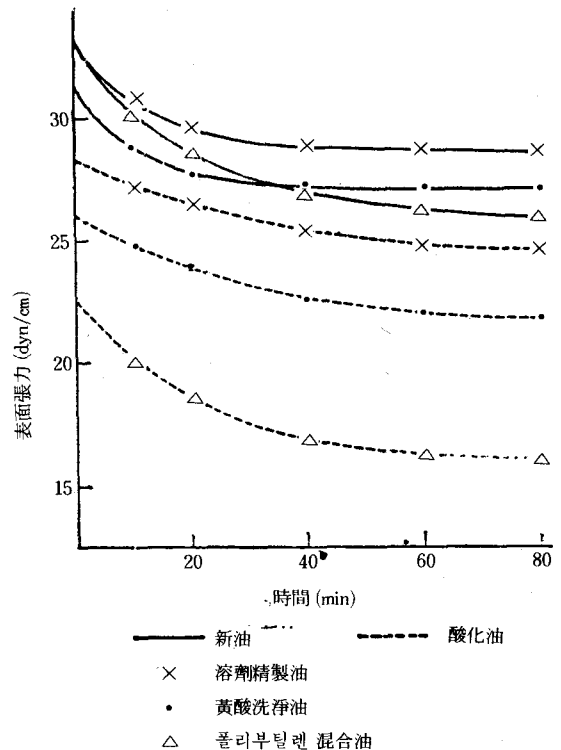


그림 20 表面張力의 時間變化

2) 界面張力과 表面擴散

물과 같이 表面張力이 큰 液面에 不溶性의 液滴을 떨어뜨리면, 液의 종류에 의하여 液面 전체에 번져 얇은 膜狀으로 되는 경우와 일부만이 번져 油滴이 그대로 남는 경우가 있다. 液體가 다른 液面上에 번져 넓어지려면, 液體의 分子相互의 吸引力보다도 위 液體와 아래 液體의 分子吸引力이 커야 한다. 이와 같은 條件下에서는 만일 아래의 液面이 매우 넓으면 液體는 그면에 單分子膜으로 되어 번져 넓어진다. 이와 같은 不溶

性인 두 液體의 接觸面의 張力은 界面張力 (Interfacial tension)이라 한다. 表面張力의 경우 液面과 接觸하는 것은 空氣 또는 蒸氣이므로, 그들의 吸引力은 매우 작으며, 不純物에 의한 表面張力의 低下도 작다. 그러나 界面張力의 경우에는 상당히 큰 液面의 吸引力이 서로 작용하므로, 表面에 나타나는 不純物에 의한 界面張力의 低下는 매우 심하다.

3) 表面活性劑

그림 21에서 보는 것처럼 界面張力이 最低로 되는 不純物들의 添加濃度는 界面에 생기는 添加物들의 單分子層의 量과 전체 기름중의 添加劑濃度의 平衡에 의해 변화한다. 이와 같이 液體의 界面張力을 변화시키는 것을 表面活性劑라 한다. 일반적으로 表面活性劑는 溶劑와 結合하여 15,000~80,000이라는 매우 큰 分子量을 가진 복잡한 化合物인데, 이와 같이 복잡한 化合物을 미셀 (micelle)이라 한다.

미셀의 存在는 光擴散法 [P·Debye : J. Phys. Coll, Chem, 53, 1(1949)]으로 測定할 수 있다.

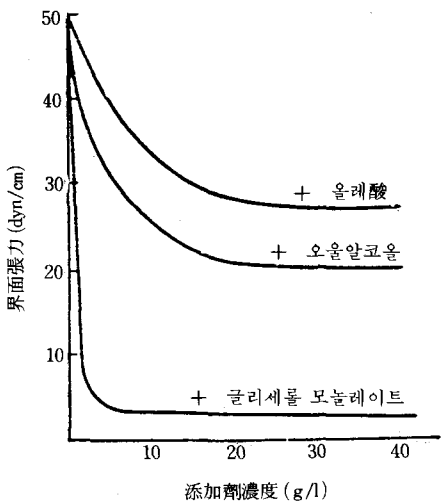


그림21 非이온活性劑 添加量과 界面張力

비눗물에 기름이 녹도록 미셀을 擴散한 溶液에는 液體單體에 不溶性의 것을 녹이는 성질이 있다.

미셀이 처음으로 界面에 생기는 表面活性劑의 添加濃度는 界面張力이 最低로 되었을 경우인데,

이것을 限界미셀濃度라 한다. 添加劑가 限界미셀濃度를 넘은 후에는 強固한 單分子層이 界面에 생긴다.

潤滑油를 加熱하여 空氣로써 약간 酸化시킨 것만으로 水面에 번지지 못하던 것이 번지게 되는 경우도 있다. 이와 같이 界面張力은 약간의 混入物에 의하여 변화하므로 그림 22에서 보는 것처럼 界面張力의 變化를 측정하여 製油工程의 管理를 행하는 수가 있다.

油滴이 水面에 번져 넓어지려면 항상 기름의 表面張力과 기름과 물의 界面張力의 합이 물의 表面張力보다 작아야 한다.

물속에 칼슘 이온이 있고, 기름속에 長鎖飽和 脂肪酸를 포함하는 경우에는 界面에 곧 強固한 膜이 생겨서 擴散이 중지된다. 이와 같이 물속에 金屬이온이 있는 경우에는 기름 水面의 擴散은 바꾸어지게 된다.

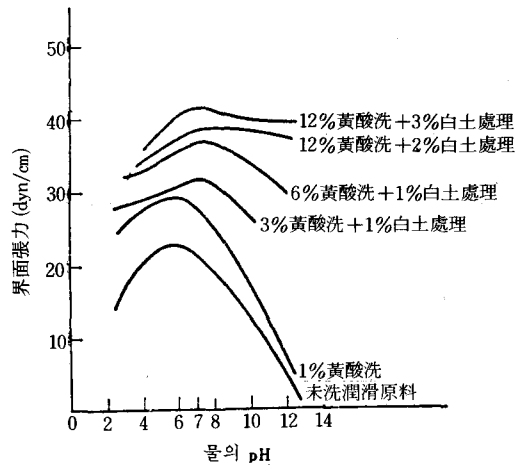


그림22 물의 pH와 界面張力

4) 表面現象의 實例

(1) 乳化 (emulsion)

어느 종류의 極性化合物은 물과 기름의 界面張力을 極小로 하는데, 이와 같은 化合物을 가하여 물과 기름의 界面張力을 2dyn/cm이하로 해서 약간 攪拌하여 界面을 흐트러지게 하면, 기름과 물은 乳化하여 에멀션을 만든다. 油滴의 지름이 작아짐에 따라 一定量의 기름의 表面積은 增大

해지므로, 전체에 擴散한 表面活性劑는 거의 界面에 吸着해 버리게 되는 것이다. 이와 같이 해서 된 安定된 에멀선 油滴의 지름은 대체로 2~6 $\mu$ 정도이고, 表面活性劑로서 過剩狀態로 있어야 된다.

(2) 氣泡 (foaming)

氣泡는 空氣粒子가 얇은 膜에 둘러싸여 있는 일종의 에멀선으로, 氣泡의 수명은 바로 없어지는 것도 있고, 오랫동안 없어지지 않는 것도 있다. 氣泡의 문제를 중요하게 다루게 된 것은 최근의 일이며, 添加劑가 사용된 엔진油, 기어油에서는 發泡 (foaming)에 의하여 부피가 증가하고 기름이 溢流하게 되기도 하며, 충분히 潤滑部에 흘러 들어가지 못하기도 하여 여러 가지 고장이 많이 일어난다.

5) 測定法

Lord Rayleigh는 毛細管에서 滴下하는 滴粒

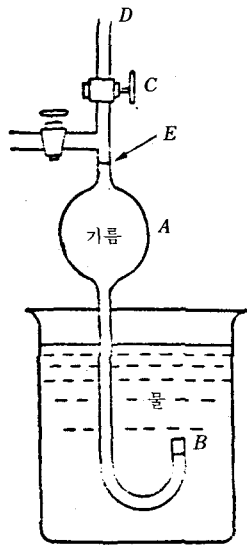


그림 23 界面張力測定裝置 (Wells and Southcombe)

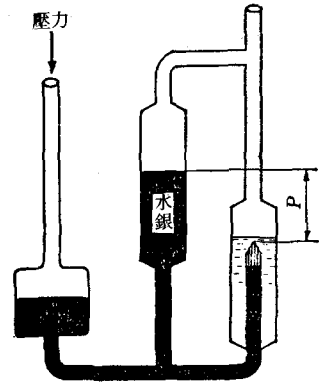


그림 24 界面張力測定裝置 (Wilson and Barnard)

하는 質量은 그液의 表面張力에 비례한다는 생각으로, 여러가지 기름속에 毛細管 끝을 담그고 毛細管에서 一定滴數의 水銀을 滴下시킨후 水銀을 四鹽化 炭素로써 洗滌하여 水銀의 重量을 秤量하여 界面張力을, 측정하였다.

이 古典的인 방법은 Wells 및 Southcombe에 의하여 그림 23에서 보는 바와 같은 測定裝置에서 측정하였다. 試料油는 球A의 E線까지 가득히 넣고 마개C를 열면 기름은 B에서 물속에 滴下하게 되므로, 이 滴數를 읽어 계산한다.

이 방법에 의하여 鑛油 (0.905)에 대한 脂肪酸 및 油脂類의 界面活性에 대한 영향을 본 결과 기름의 滴數와 比界面張力과의 관계는 表 7에서 보는 바와 같다.

그림 24는 Wilson 및 Barnard가 고안한 界面張力 測定裝置로서 水銀을 기름속에서 壓出시키는데, 필요한 壓力, 즉 水銀柱의 差 ( $\rho$ )를 측정하고, 水銀의 密度 ( $P$ ), 毛細管의 반지름 ( $\gamma$ )에서 다음 식에 의하여 界面張力 ( $\sigma$ )을 계산하였다.

$$\sigma = \frac{P\gamma}{2} \left( 1 - \frac{\rho\gamma}{P} - \frac{\rho^2\gamma^2}{P^2} \right) \dots\dots\dots(33)$$

(끝)