

非뉴우튼流體의 流動現象

劉 丁 烈

<서울대학교 機械工學科 教授>

1. 머리 말

乳濁液(emulsion), 懸濁液(suspension), 高分子溶液(polymer solution) 및 高分子 熔融物(polymer melt) 등의 流動에 대하여는 應力과 速度勾配 사이에 線形的인 관계가 성립되지 않는다. 이런 流體들은 뉴우튼流體들의 경우와는 달리 단 한번의 粘性係數 測定만으로는 완전한 流變學的(rheological) 特徵을 파악할 수 없으므로 이들을 통털어서 非뉴우튼流體(non-Newtonian fluid) 라고 한다. 이들의 應力과 速度勾配 사이의 非線形的인 관계를 고찰하는 非뉴우튼體流力學은 최근에 빠르게 발전하고 있는 流體力學의 한 分野이며, 高分子 工程, 食品, 生物工學 및 油田 등의 여러 産業部門에서 많은 관심의 대상이 되고 있다. 여기서는 뉴우튼유체에서 관찰될 수 없는 비뉴우튼유체의 독특한 유동 현상에 대한 이해를 증진시킴으로써, 비뉴우튼유체역학의 여러 문제들을 취급하는데 필요한 기본지식을 제공하고자 한다.

2. 剪斷率(Shear Rate)에 依存하는 粘性係數(Viscosity)

비뉴우튼유체의 定常單純剪斷流動(steady simple shear flow)에 있어서 τ_{12} 를 粘性剪斷應力 $\dot{\gamma}$ 를 剪斷率로 하여 粘性係數를

$$\eta = \frac{\tau_{12}}{\dot{\gamma}} \quad (1)$$

의 관계로부터 계산하면, 이것은 常數가 아니고 剪斷率에 따라 변화한다. 그러므로 점성계수는 다음과 같이 전단율의 함수로 표시된다.

$$\eta = \eta(\dot{\gamma}) \quad (2)$$

만일 전단율이 증가함에 따라 점성계수가 감소하면, 유체는 剪斷薄化(shear thinning) 또는 偽塑性(pseudo-plastic)이라고 하며, 반대로 전단율이 증가함에 따라 점성계수가 증가하면 유체는 剪斷厚化(shear thickening) 또는 膨脹性(dilatant)이라고 한다. 이와 같은 유체의 變動은 그림 1에 나타나 있다.

그림 2에서는 위에서 언급된 세 가지 유체들을 관찰하는 실험이 보여졌는데, 이것은 점성계수의 측정에 통상적으로 사용되는 것과 같은 형태의 실험이다⁽¹⁾. 뉴우튼유체의 경우에는 관을 통하여 유체를 밀어보내는 壓力水頭가 2배로 될 때(그림 2a), 流量도 2배가 된다(그림 2b). 그러나 어떤 高分子 溶液은 수두가 2배로 될

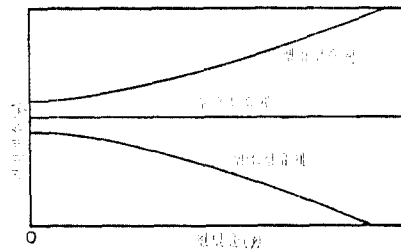


그림 1 각종 유체의 점성 함수

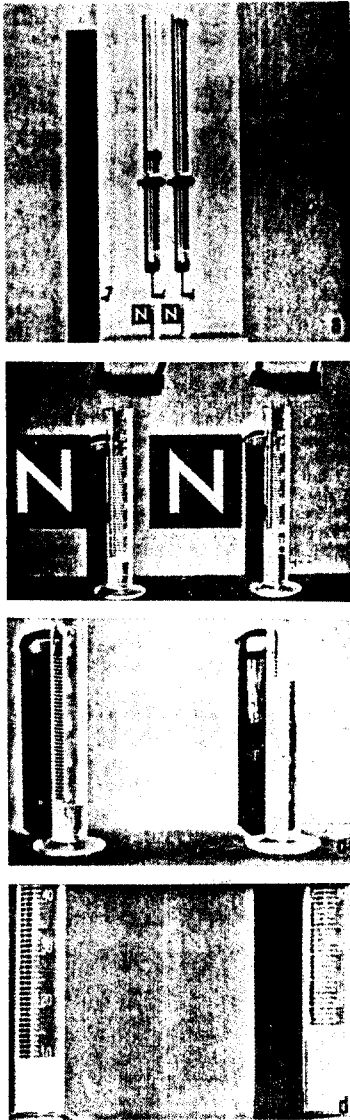


그림 2 파이프유트에서의 비선형성. 동일한 유체가 동일한 직경을 가지는 두개의 큰 관속에 채워져 있는데, 이 관들에는 동일한 출구 관들이 연결되어 있으며, 동시에 개폐될 수 있는 볼밸브가 부착되어 있다. 출구관의 바닥으로부터 자유표면까지의 수두는 2대 1의 비율로 유지되며, 실험은 세가지 다른 유체들을 사용하여 차례로 수행된다. 뉴우튼유체(b)의 경우에는 유량은 구동 수두에 거의 비례한다. 고분자용액(c)의 경우에는 수두가 2배로 되었을 때 유량은 2배 이상으로 된다(전단 박화). 현탁액(d)의 경우에는 2배의 수두에 대해서도 유량은 2배가 되지 않는다(전단후화).

때, 그유량이 2배 이상으로 되는가 하면(전단 박화, 그림 2c), 어떤 현탁액의 경우에는 반대의 현상이 발생한다(전단후화, 그림 2d).

式 (2)와 같은 粘性函數(viscosity function)만으로 완전한 유변학적 특성이 알려지는 유체는 “一般화된 뉴우튼流體(generalized Newtonian fluid)”라고 불리우는데, 실제로는 특정한 형태의 變形(deformation)에 대한 복잡한 거동을 近似的으로 표시할 때에만 의미가 있는 유체라고 할 수 있다.

3. 塑性(Plasticity)

어떤 물질이 流動을 일으키지 않으면서 일정한 양의 應力, 즉 “降伏應力(yield stress)”보다 낮은 應력을 지탱하다가 이 항복應력보다 높은 應력에 대하여는 流體처럼 連續的으로 變形하는

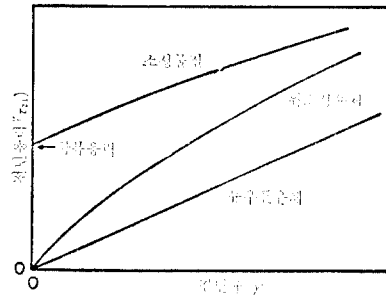


그림 3 소성물질, 위소성 유체 및 뉴우튼유체에 대한 전단을 대 전단應력의 곡선

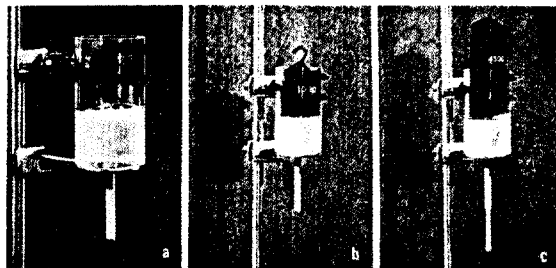


그림 4 원통속에 들어 있는 진흙 현탁액은 자중에 의하거나(a) 또 가벼운 피스톤 위에 놓여진 작은 추에 의해서도(b) 열려진 관을 통하여 흘러 나오지 않는다. 더 큰 추를 올려 놓으면 현탁액은 유동을 일으킨다(c) 유동이 발생하기 위해서는 전단應력이 임계치를 초과하여야 한다.

現象을 塑性이라고 한다. 그림 3에는 이런 형태의 거동이 뉴우튼 및 위소성 형태의 거동과 비교되어 보여진다.

그림 4에서는 진흙 현탁액이 自重이나 또는 가벼운 錘에 의한 驅動 壓力으로서는 유동을 일으키지 않지만, 충분히 무거운 錘에 의한 驅動 壓力에 의하여는 유동을 일으키는 것을 보여준다⁽¹⁾ 만일 무거운 추가 제거된다면 유동은 즉시 멈추게 된다. 이런 물질들은 만일 전단응력이 臨界值보다 작을 때는 平衡狀態로서 전단응력을 지탱할 수 있다.

4. 時間에 依存하는 粘性係數

만일 전단율의 변화에 따라 유체의 構造가 調整되는데 상당한 時間을 요구한다면, 單純剪斷 實驗에서 측정된 점성계수는 전단율 뿐 아니라 시간에 따라서도 변한다.

$$\eta = \eta(\dot{\gamma}, t) \quad (3)$$

만일 시간에 따라 점성계수가 감소한다면, 유체는 석소트로픽(thixotropic)이라고 하며, 시간에 따라 점성계수가 증가한다면 리오펙틱(rheopectic)이라고 한다. 전자가 더 흔히 관찰될 수 있으며, 이 현상들은 그림 5에 개략적으로 스케치되었다.

5. 履歷(History)에 依存하는 應力

플라스틱 熔融物, 蛋白質 溶液(예를들면, 계란의 흰자위) 등에서의 응력은 變形勾配 履歷(history of deformation gradient)의 비선형 함수

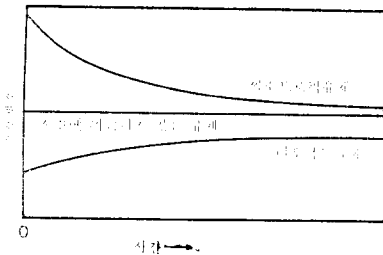


그림 5 시간에 의존하는 구조를 가지는 유체들에 대한 점성계수 대 시간의 곡선

수로 표시되는데, 이런 유체들을 “記憶流體(memory fluid)”라고 부른다. 기억유체에서의 응력의 현재 값은 현재의 변형 상태만으로는 결정될 수 없는데, 왜냐하면 그것은 유체가 과거에 경험하였던 변형에 의존하기 때문이다. 역으로 현재의 응력은 현재의 변형 상태를 결정짓지 않는다.

5.1. 粘彈性流體(Viscoelastic Fluid)

결과적으로 기억유체는 彈性和 같은 거동을 나타낼 때도 있는데, 그러므로 이 유체들을 粘彈性流體라고 부르기도 한다. 그러나 彈性固體와는 달리, 기억유체는 모든 응력들이 제거되었을 때 변함없이 돌아오는 선형적인 모양을 가지지는 않는다. 그림 6에서는 실리콘 퍼티(silicone putty)가 충분한 시간이 주어진다면, 重力과 같은 작은 힘에 의하여서도 유동을 일으키게 되는 것을 보여준다⁽¹⁾ 그러나 급격한 충격을 가하는

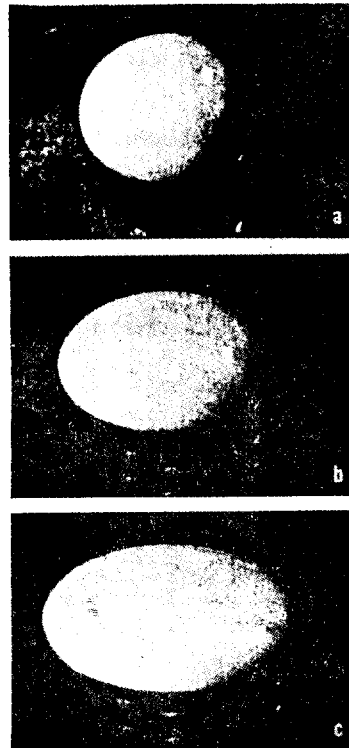


그림 6 실리콘 퍼티의 공이 자중의 힘에 의하여 한 시간 내에 진흙덩어리처럼 이완된다.

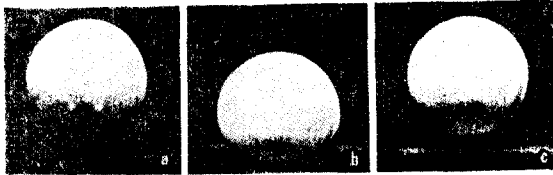


그림 7 실리콘 퍼티 공이 단단한 표면 위에서 튀어 오를 때 충격에 의하여 변형은 되지만, 되풀이 동시에 마치 탄성고체처럼 원래 형태를 회복한다.

짧은 시간 동안에는 그림 7에서와 같이 탄성고체처럼 거동하는데, 왜냐하면 그것은 종전의 球形態를 잃어버릴 기회가 없기 때문이다⁽¹⁾. 실리콘 퍼티에서의 응력에 대한 弛緩時間은 충격으로 인하여 내려앉는데 걸리는 시간보다 훨씬 작지만, 급격한 충격 시간보다는 훨씬 길다. 그러므로 퍼티는 실험의 特性時間을 弛緩時間과 비교하는데 따라서 탄성고체로부터 점성유체에 이르기까지 넓은 범위의 거동을 나타낼 수 있다. 점탄성유체의 거동을 알기 쉽게 설명하기 위하여 그림 8에는 몇가지 線形 粘彈性 應答 (linear viscoelastic response)을 나타내는 機械的 模型들이 예시되었다⁽²⁾. 그림 8a는 선형탄성 또는 후크固體(Hookean solid)를 나타내는데, 構成方程式(constitutive equation), 즉 응력과 전단 및 시간과의 관계를 나타내는 식은 τ 를 剪斷變形度, G 를 剪斷彈性係數(shear modulus)로 하여

$$\tau = G\gamma \quad (4)$$

의 형태를 가진다. 마찬가지로 선형점성 또는 뉴우튼流體는 그림 8b와 같이 데시포트(dashpot)로 나타낼 수 있으며 구성방정식은 다음과 같다.

$$\tau = \eta\dot{\gamma} \quad (5)$$

한편, 맥스웰 유체(Maxwell fluid)는 그림 3c와 같이 나타낼 수 있으며 구성방정식은

$$\tau = \eta\dot{\gamma} - \lambda\dot{\tau} \quad (6)$$

로서 $\lambda = \eta/G$ 는 시간의 차원을 가지므로 弛緩時間(relaxation time)이라고 불리운다. 여기서는 그밖에 켈빈보이그트 고체(Kelvin-Voigt solid) 등에 대한 선형점탄성 모형들도 可視的으로 파악할 수 있다.

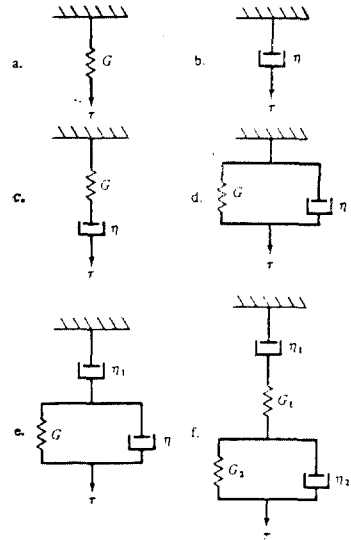


그림 8 선형 점탄성 모형. (a) 선형탄성, (b) 선형점성, (c) 맥스웰 요소, (d) 보이그트 켈빈요소, (e) 3파라미터, (f) 4파라미터

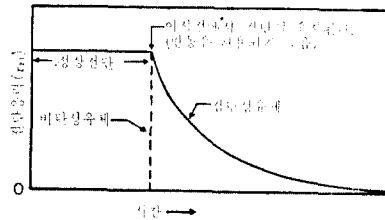


그림 9 정상전단이 중지된 후의 응력 이완

5.2. 應力弛緩(Stress Relaxation)

어떤 물질에 定常單純剪斷($\dot{\gamma} = \text{const}$)을 가하였다가, 이 운동을 갑자기 중지시키고 變形度를 일정하게 유지시키는($\gamma = \text{const}$) 실험을 고찰하자. 만일 관련된 물질이 뉴우튼유체 또는 다른 非彈性流體(inelastic fluid)일 경우에는 전단운동이 일단 중지되면 아무 응력도 작용하지 않을 것이다. 그러므로 정상전단이 중지된 후에는 비탄성유체에서 응력이완은 순간적으로 일어난다고 할수 있다. 그러나 점탄성유체의 경우에는 응력은 순간적으로 영으로 돌아오지 않고 그림 9에 보여진 것과 같은 형태의 응력이완 곡선이 얻어진다.

5.3. 變形度 回復(Strain Recovery, Recoil)

이번에는 어떤 물질에 일정한 전단응력을 가하고 있다가, 이 전단응력을 순간적으로 제거시키는 실험을 고찰하자(creep testing). 관련된 물질이 맥스웰 유체인 경우에 시간에 따른 변형을 그림 10에 예시하였다⁽²⁾. 만일 가해진 응력이 τ_0 라면 우선 순간적인 스프링의 伸張으로 인하여 유체는 τ_0/G 의 변형을 일으키고, 응력이 τ_0 로 일정하게 유지되는 동안은 대시포트가 τ_0/η 의 비율로 線形的으로 늘어났다. 그러나 응력이 제거될 때, 스프링은 최초의 伸張과 동일한 양만큼 순간적으로 收縮되고 다시 응력의 변화가 없는 한 최종변형상태를 유지한다. 이와 같은 과정을 變形度 回復 또는 彈性 回復(elastic recovery)이라고 하며 대시포트는 회복되지 않고 永久變形(permanent set), $(\frac{\tau_0}{\eta})t_s$ 를 남긴다. 同心 圓筒裝置를 사용함으로써 이와 같은 현상을 관찰하는 실험이 그림 11에 보여진다. 즉, 안쪽 원통에 일정한 토크를 가한 후에 순간적으로 이를 제거하는 실험으로서 시간에 따른 角 變形(angular deformation)이 차트에 기록되었다⁽¹⁾.

뉴우튼유체에 대하여는 (그림 11b)토크가 가해져자마자 거의 일정한 회전속도가 얻어지고 추가 제거되는 즉시 운동이 중단되는 것을 볼 수 있다. 동일한 장치에 어떤 고분자 용액을 채워 넣었을 경우에는 (그림 11c), 안쪽 원통이 일정한 회전속도를 얻을 때까지 상당한 시간이 걸

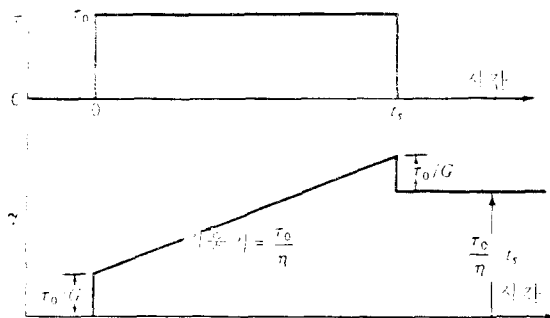


그림 10 맥스웰 요소의 크리프 응답

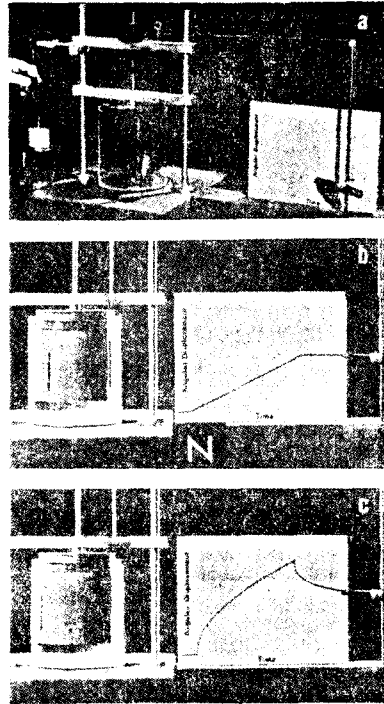


그림 11 동축 원통 사이의 환상 공간에 유체를 채우고, 폴리와 추의 계를 이용하여 회전할 수 있는 안쪽 원통에 일정한 토크를 갑자기 걸어줌으로써 유체에 응력을 가한다. 추가 바닥에 닿아서 슬립 토글장치에 의하여 스프링으로부터 분리될 때 토크는 제거된다. 안쪽 원통 위의 구동 드림에 부착된 스트링에 의하여 펜이 수직으로 움직인다. 차트가 왼쪽으로 균일한 속도로 움직임에 따라 시간에 대한 안쪽 원통의 위치가 기록된다(b) 뉴우튼 유체("N"). (c) 고분자용액.

리며, 토크가 제거될 때에는 응력이 작용하지 않음에도 불구하고 변형을 일으키는 것, 즉 변형도 회복이 발생하는 것을 볼 수 있다.

6. 法線應力 效果(Normal Stress Effect)

응력과 변형 사이의 비선형적인 관계는 전단 응력 뿐 아니라 법선응력에도 영향을 미친다. 두 개의 無限 平行平板 사이에 있는 뉴우튼유체의 정상단순전단유동에서는 無限少의 體積要素에 작용하는 법선응력은 그림 12a에 표시된 바

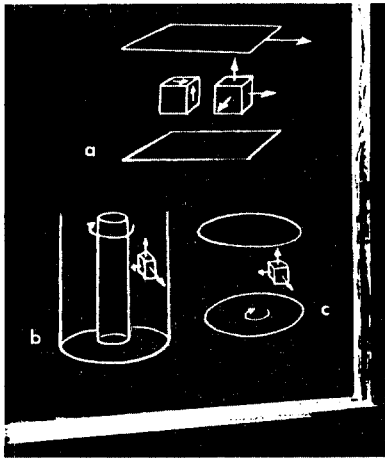


그림 12 유체 요소에 대한 법선응력, (a) 단순전단 유동. (b) 원형 쿠퍼트유동. (c) 비틀림 전달 유동.

와 같이 세 방향에서 모두 동일하지만, 기억유체의 경우에는 그렇지 않다. 이런 사실은 회전하는 동심원통 사이의 유동(그림 12b), 회전하는 평행원판(그림 12c) 및 그 밖의 다른 단순층류유동에서도 마찬가지로 성립된다⁽¹⁾. 결과적으로 점탄성유체의 법선응력의 분포는 뉴우튼유체의 경우와 판이하게 다를 수 있다. 예를 들면 회전하는 동심원통 사이의 뉴우튼유체의 유동에서는(그림 13a), 안쪽 원통벽에서보다 바깥쪽 원통벽에서 더 높은 법선응력이 작용되지만, 고분자용액의 유동에서는(그림 13b) 정반대로 안쪽 원통벽에서의 압력이 더 높게 되는데⁽¹⁾ 이 현상을 와이센버그 효과(weissenberg effect)라고 한다. 이에 따라서 環形 空間 사이의 유체의 自由 表面의 형태는 두 경우에 상당히 다르게 된다. 만일 안쪽 원통을 그림 14에서의 같이 회전하는 圓形棒으로 대체시킨다면, 뉴우튼유체의 경우에는 회전 원형봉 근처의 액체가 遠心力에 의하여 밀려나므로 자유표면이 낮아지게 되고, 점탄성유체의 경우에는 액체가 반대방향으로 이동하여 중심부로 돌아 들어와서 원형봉을 타고 기어오르게 된다.⁽³⁾ 그러므로 이 현상을 登棒效果(rod climbing effect)라고 부르기도 한다. 법선응력의 분포는 회전하는 平行 圓板 사이에 있는 뉴우튼유체와 점탄성유체의 유동에 있어서도 상당

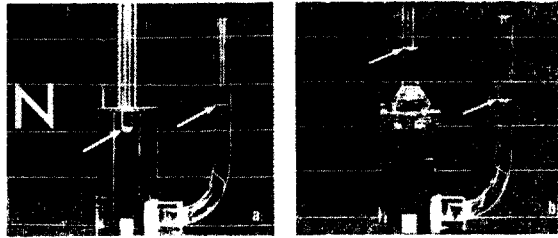


그림 13 바깥 쪽 원통과 동심 회전축 사이의 환상공간에서의 쿠퍼트 유동. 축은 증공판으로서 환상공간과는 구멍으로 연결된다. 관 내의 유체 높이는 구멍에서의 법선응력을 나타낸다. 바깥쪽 원통에는 그곳에 작용하는 법선응력을 나타내기 위하여 역시 구멍이 나 있고 마노미터가 붙어있다. 화살표는 마노미터들에서의 액체수준을 가리킨다. 뉴우튼유체의 경우(a)에는 원심력에 의하여 더 큰 반경에서의 법선응력이 더 크다. 고분자용액의 경우(b)에는 원심 압력구배보다도 비선형 효과가 더 지배적이므로 안쪽 원통에서의 법선응력이 훨씬 더 크다. 고분자용액은 또한 회전축을 따라 기어오른다.

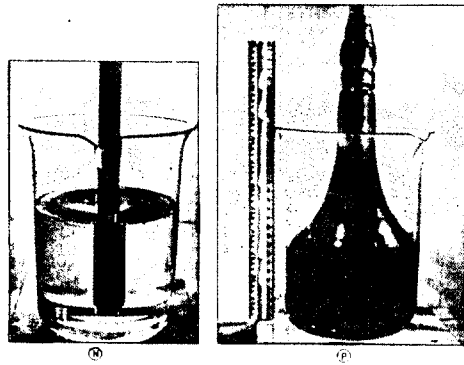


그림 14 회전하는 원형봉과 고정된 원통. ㉞ 뉴우튼유체인 글리세린은 와동을 보여준다; ㉟ 고분자용액인 폴리악릴라마이드의 글리세린용액은 원형봉을 따라 기어 오른다. 원형봉은 폴리악릴라마이드 용액에서 보다 글리세린에서 더 빠르게 회전한다. 비교적 낮은 회전속도에서는 고분자 용액은 기어오르지만 뉴우튼유체의 자유표면은 평면을 유지한다.

한 차이가 있다. 뉴우튼유체의 법선응력 분포는 원심력에 의하여 지배되며 그림 15a에서와 같이 원판의 중심에서 최저 응력이 발생된다. 고분자 용액에서는 그림 15b에서와 같이 최고 법선응력이 중심에서 작용한다.

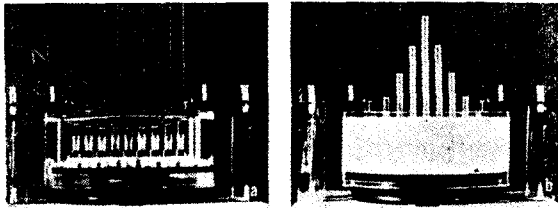


그림 15 회전하는 평행원판 사이의 유동. 위쪽 원판은 정지하고 있으며 직경을 따라 압력구멍과 마노미터들이 장치되었다. 바깥 쪽 원통이 회전함으로써 위쪽 원판과 용기의 바닥 사이에 채워진 유체가 전단된다. 위쪽 원판에서의 범선응력분포가 뉴우튼유체(a) 및 특정한 비뉴우튼유체(b)에 대하여 보여진다.

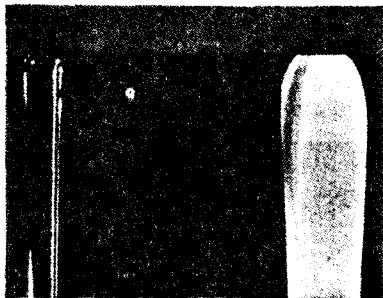


그림 16 두꺼운 평판에 설치된 두 개의 동일한 오리피스로부터 동일한 압력에 의하여 흘러나오는 제트의 형태가 뉴우튼유체(왼편) 및 고분자용액(오른편)에 대하여 비교된다.

7. 其他의 流動現象

7.1. 다이 스웰(Die Swell)

오리피스(orifice)나 다이(die)를 통하여 흘러나오는 뉴우튼유체와 점탄성유체의 유동에 있어서도 상당한 차이가 있다. 그림 16에서는 고분자 용액의 제트가 오리피스를 통하여 흘러나오게 되면 오리피스보다 훨씬 더 큰 직경을 가지게 되는데 반하여, 클리세린(뉴우튼유체)의 제트는 오리피스보다 작은 직경을 가지는 것을 보여준다. 이런 현상을 다이 스웰 또는 배러스 효과(Barus effect)라고 부른다. 플라스틱 제품들이 押出工程으로 제작된다면, 이 효과는 흔히 발생되며 다이의 직경은 최종 제품보다 더 작게 설계되어야 한다.

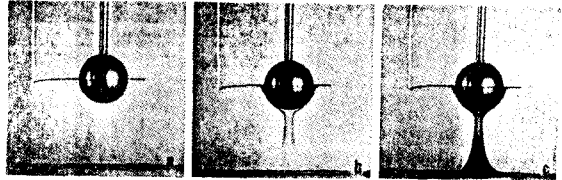


그림 17 비뉴우튼유체에서 회전하는 구. 왼쪽에 있는 판으로부터 흘러나오는 염료는 유동이 적도 평면에서 반경방향으로 안쪽으로 돌아들어와서 극에서는 축방향으로 구를 떠나는 것을 순차적으로 보여준다. 뉴우튼 점성유체에서 회전하는 구에 의하여 유도된 2차유동은 반대 현상, 즉 극에서는 구를 향하고 적도에서는 구로부터 멀어지는 현상을 보여줄 것이다.

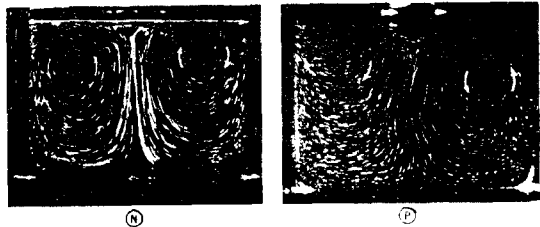


그림 18 원판—원통계에서의 2차유동. (N) 뉴우튼유체는 중심에서 위로 이동하는 반면 (P) 점탄성유체인 폴리아크릴라마이드(Separan 30)/글리세롤/물은 중심에서 아래로 이동한다.

7.2. 2次 流動(Secondary Flow) 現象

그림 17에서 보여진 바와 같이 고분자 용액 내에서 회전하고 있는 구에 의한 流動은 赤道에서는 안으로 향하며, 極에서는 바깥으로 향한다. 뉴우튼유체에서 회전하고 있는 구에서는 경반대의 현상이 일어난다⁽¹⁾. 이와 유사한 현상은 그림 18에서와 같이 고정된 원통 내에 채워진 유체 위의 회전하는 원판으로 인한 2차유동에 대해서도 관찰된다.

7.3. 抗力 減少(Drag Reduction)

어떤 뉴우튼유체에 극히 少量의 고분자를 첨가하더라도 동일한 유량에 대한 항력이 현저히 감소되는 현상을 항력감소라고 하는데, 이것은 톰즈 효과(Toms effect)라고도 한다. 그림 19는 소량의 폴리에틸렌 옥사이드(polyethylene oxide)의 첨가 여부에 따라서 물에 대한 마찰계수에 현저한 변화가 일어나는 것을 보여준다. 물론

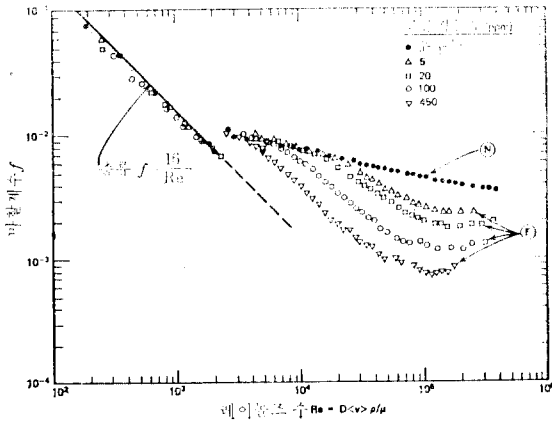


그림 19 폴리에틸렌 옥사이드(점성계수 평균분자량 = 6.1×10^6)의 수용액에 대한 마찰계수. 난류영역에서 고분자용액에 대한 곡선은 용매에 대한 곡선보다 아래에 있으며 항력감소를 나타낸다 ① 뉴우튼유체, ② 고분자용액.

항력 감소는 난류현상으로서, 그 發生機構에 대하여는 아직도 확실히 알려져 있지 않으나 최근에 훌륭한 抗力減少劑에 관한 연구가 많이 이루어지고 있다.

7.4. 其他

지금까지 고찰한 유동현상들 외에도 점탄성유체는 뉴우튼유체에 비하여 여러가지 다른 성질들을 나타낸다. 예를 들어 점탄성유체의 압력측정장치에서 발생하는 壓力구멍誤差(pressure hole error), 第2法線應力差異(second normal stress difference, $\tau_{22} - \tau_{33}$)를 측정하는데 사용되는 傾斜진흙통(tilted trough), 管子 없는 사이펀(tubuleless syphon), 웨블러 效果(Uebler effect)와 突然縮少流動(sudden contraction flow), 渦動抑制

(vortex inhibition), 등이 있으나⁽⁴⁾ 紙面 관계상 상세한 설명은 생략하기로 한다.

8. 맺는 말

모든 비뉴우튼유체들이 이상에서 논의된 바와 같은 극적인 효과들을 보여주는 것은 아니다. 그러나 고분자 및 현탁액을 포함하는 유체들을 취급할 때, 뉴우튼유체에 대하여 예측될 수 있는 것과는 판이하게 다른 유동현상 및 응력분포를 발견하게 되더라도 결코 놀라운 일은 아니라고 말할 수 있다. 실제로, 비뉴우튼유체에 관하여는 아직도 많은 연구의 여지가 남아있다. 현재로서도 이들 유동현상들을 定性的으로 뿐 아니라 定量的으로도 설명하고자 여러가지 유체모형들이 제안되고 있으며, 비뉴우튼유체들의 독특한 성질들을 공학의 여러부문에서 효과적으로 이용하기 위한 노력들이 기울여지고 있다.

참 고 문 헌

- (1) The NCFMF Book of Film Notes, Illustrated Experiments in Fluid Mechanics: Rheological Behavior of Fluids, 4th Printing, The MIT Press, 1980.
- (2) S.L. Rosen, Fundamental Principles of Polymeric Materials, Barnes and Noble, 1971.
- (3) R.B. Bird, R.C. Armstrong, O. Hassager and C.F. Curtiss, Dynamics of Polymeric Liquids, John Wiley and Sons, 1977.
- (4) W.R. Schowalter, Mechanics of Non-Newtonian Fluids, Pergamon Press, 1978.

