

## 전기유변성 유체\*

문탁진

고려대학교 재료공학과

어떤 유체는 전기장에서 순간적으로 고체화한다. 이러한 다변형의 물질은 더욱 신속하고 적절한 기계의 앞날을 약속하고 있다.

T-1000 (영화 터미네이터2; 심판의 날에서 생동하는 거의 불멸의 로봇)는 능숙하게 액체에서 고체로 변한다. T-1000은 총탄으로 관통되었을 때, 로봇의 액체-금속 피부는 관통된 구멍으로 흘러 들어가고, 산산조각이 날 때 T-1000은 녹아버린 후에 다시 제원형으로 응결된다. 전기유변성 유체는 이 영화제작자의 상상력에 어느 정도 적용될 수 있을 것이다.

전기유변성 유체는 전기장이 있는 곳에서 변형을 일으키는 물질이다. 주어진 전기장의 세기에 따라 전기유변성 유체는 물처럼 자유롭게 흐르기도 하고, 꿀처럼 진득하게 흐르기도 하며 제라틴처럼 고체화하기도 한다. 참으로 물질이 수천분의 일초사이에 한 상태에서 다른 상태로 변할 수 있는 것이다. 전기유변성 유체는 만들기 쉽다; 절연액체에 미세적 입자가 분산된 것이다. 그러나 아직은 상업용으로 쓰이지 못하고 있다. 여러가지 문제점 중의 하나가 고체로서는 구조적으로 약하고 또, 액체로서는 마찰성이 문제이며, 특히 고온에서는 화학적으로 불안정하다는 것이다.

최근에 몇몇 과학자들은 마찰성이 적은 성분을 내포하고 화학적으로 좀더 안정한 유체들을 만들 수 있게 되었다. 그러나 구조에 약점이 있다는 것이 아직은 심각한 장애 요소로 남아 있다. 만일 실용적인 전기유변성 유체를 구현하고자 한다면, 단단한 고체를 만들 수 있는, 분산 입자들간의 전기적 인력에 관한 확고한 지식이 있어야 한다.

과학자들은 전기유변성 유체에 많은 흥미를

가지고 있는데 그것은 물리적 성질이 유용할 뿐 아니라, 복잡 다양하기 때문이다. 전기 유변성 유체안에 있는 입자들은 여러가지 복잡한 구조를 이루게 된다. 한 극단에서 유체가 자유롭게 흐를 때는 입자들은 서로 독립적으로 움직인다. 또 다른 극단에서 유체가 고체화할 때는 입자들은 서로 연결되어 얽은 사슬을 형성하여 굽은 줄을 이루는 것을 눈으로도 볼 수 있게 된다.

이와 같이 전기 유변성 유체를 연구함에 있어 우리는 보편적인 액체물리나 고체물리와는 거리가 먼, 즉 전형적인 액체와 고체사이 중간에 있는 물질의 거동을 조사하는 것이다. 최근 연구에 의하여 비정상 상태에서의 입자간의 인력에 대해 새로이 눈을 뜨게 되었다. 이러한 새로운 발견은 보다 강한 유체를 설계할 수 있음을 시사해 주고 있는 것이다.

1947년경 윈스로우(Willis M.Winslow)가 약 8년간의 관찰 끝에 전기유변성 유체에 관한 특허를 얻은 때부터 과학자들은 전기유변성 효과에 흥미를 갖게되었다. 간단히 옥수수오일에 옥수수전분이 분산된 물질과 같은 것이 우수한 전기유변성 유체가 될 수 있다는 것이 얼마되지 않아 발견되었던 것이다. 이 가정용 식용 물질은 1000볼트/mm 정도의 강한 전장에서 전기유변성 효과를 나타낸다. 이 효과는, 예를 들어, 간격이 1 mm되는 두 금속 판사이에 유체를 놓고 전극을 1000볼트로 올리면 나타난다. 이 전압은 매우 높아 보이지만 소요되는 전력은 실은 적은 것이다. 유체가 절연체이기 때문에 오직 미세한 전류만이 흐르게 된다. 따라서 전극의 전하가 높은 전압으로 급승하게 되며, 마치 사람의 피부에 수천볼트의 정전기가 쉽게 누적되는 것과 같은 것이다. 윈스로우가 특허를 얻은 유체는

\* Thomas C. Halsey와 James E. Martin이 Scientific American 1993년 10월호에 기고한 내용을 번역한 것임.

아주 대단한 발견이었으며 전기유변성 유체의 전망을 밝게 해주었다. 예를 들어 자동차 공업에서 전기유변성 클러치(clutch)를 생각할 수 있다. 클러치안에 이 유체를 쓰면 차 엔진을 동력샤프트(shaft)에 연결시켜 바퀴에 동력을 전달하게 된다. 고체화가 되면 유체는 동력 샤프트를 회전시키게 된다. 다시 액화가 되면 유체는 엔진을 동력 샤프트에서 떨어지게 하여 자유로이 회전케 하여 마치 중립기어(gear)에 있는 것처럼 된다. 이러한 클러치는 마모나 파손을 고려할 부분이 거의 없다. 반응 시간은 매우 짧으므로, 대부분의 기계적 클러치가 느린 것으로 보이게 될 것이다. 전기유변성 유체는 밸브가 없는 유압시스템에도 적용될 것으로 전망하고 있는데 유체가 고체화 되면 얇은 단면의 파이프에 흐르는 흐름을 차단하게 된다.

이러한 아이디어들은 아직은 매혹적이지만 전기유변성 유체가 참으로 고무적이라는 것은 유체가 계속 점성도를 변화한다는 점을 이용한 장치에 쓸 수 있다는 것이다. 전기유변성 유체의 유속을 전장을 가해 조절할 수 있으므로, 충격 흡수 장치로 응용할 수 있다는 가능성 때문에 자동차 업체, 그리고 부상기차를 제안하는 사람들에게도 흥미로운 것이 된다(이러한 기차는 레일에 붙어 달리지는 않지만, 충격 흡수 장치는 급정거와 발차에서 생기는 충격을 흡수하게 된다). 일반 충격 흡수 장치는 실린더 안에 피스톤이 있어 압축되면 진하고 점성이 큰 오일을 작은 구멍(오레피스)에 밀어 넣는다. 유체는 느리고 끈끈한 운동에 의해 충격되는 힘을 흡수하게 되며 유체는 반복하는 동안에 큰 구멍을 통해 재빨리 충격 흡수 장치로 되돌아가게 된다. 불행히도 오일의 점성은 온도에 민감하다. 추운 날씨에 오일은 진하게 되어 충격 흡수 장치는 뻑뻑하게 된다. 더욱이 반복되는 압축에 의해 오일은 가열되어 잘 흐르게 되므로 가장 필요로 할 때인 길고 고르지 못한 길에서 흡수장치의 흡수 능력이 거의 없어진다. 이러한 어려움을 이겨낼 한가지 방법은 필요에 따라 흡수 장치의 구멍크기를 조절할 수 있는 기계적 시스템을 도입하는 것이다.

전기유변성 유체는 반응 시간이 수천분의 일

초가 되고 기계적으로 조절할 필요가 없는 충격 흡수 장치의 제작을 가능하게 한다. 전기 유변성 유체를 피스톤에 채우고 전극과 마이크로 프로세서를 붙이면 충격 흡수 장치를 만들 수 있다. 피스톤이 움직이면 마이크로 프로세서는 전극의 전압을 즉각적으로 조절해서 유체의 점성을 변하게 한다. 이러한 신속한 조절에 의해 유체의 점성은 중간 동작에서 증가되어 구멍에서의 흡수 효율을 적절하게 하는 것이다. 유체는 빠른 회복에 의해 다시 점성을 작게할 수 있다. 이와 같이 단일 충격 흡수 장치는 여러 종류의 자동차와 다양한 운전조건에 따라 활용될 수 있다.

그러나 기존의 전기 유변성 유체는 과중한 조건하에서는 작동 되지 않는다. 이 화합물은 가끔 고체로서는 너무 무르고 자주 사용한다면 고체화하는데 높은 전압이 필요하게 되고 휘발성 유체성분을 가열시켜 궁극에는 휘발시켜 버린다. 이러한 문제에 접근하기 위해 우리는 어떻게 전장이 고체화를 일으키나를 조사하고 있다. 이상적으로는 현재 필요로 하는 전압보다 낮은 전압에서 강하게 고체화하는 유체가 바람직한 것이다.

과학자들은 언젠가 전기 유변성 효과가 전기 분극이라는 현상에 기인함을 알게 되었다. 전장에서-예를 들어 전기를 띤 두 금속판 사이에서-입자안의 양으로 하전된 양자(proton)는 다른 전극으로 끌려 가는 반면에 음으로 하전된 전자는 반대 전극으로 끌려가는 것이다. 그 결과 양과 음의 전하는 입자안에서 어쨌건 서로 반대 방향으로 이동하게 된다. 따라서 전장에 있는 입자는 전기적으로 쌍극이 되며 양극과 음극은 자석의 N극, S극과 마찬가지로 된다. 이 효과의 세기는 물질의 전기분극에 의존한다. 분극이 크면 많은 양의 전하가 입자의 반대극에 많은 거리로 이동한다. 분극이 작으면 입자는 가해진 전장에 거의 반응을 보이지 않는다.

유체에 분극 입자가 많으면 전기적 인력이 복잡해진다. 가장 간단한 경우는 두개의 입자가 강한 전장에 놓여 있어, 문제를 보기 위해, 각 입자에서 양극은 위에 있고 음극은 밑에 있는 경우이다. 이 두입자간의 전기적 인력이나 반발력은 이들이 서로 어떻게 접근하는 가에 달려

있다. 만일 한 입자가 직접 다른 입자의 밑으로 이동한다면 처음 입자의 양극은 다른 입자의 음극에 접근하게 되어 서로 다른 전하가 끌어당기므로 전기적으로 인력을 나타내게 된다.

만일 한 입자가 어떻게 해서 다른 입자의 옆에 놓이게 되어 로마글자 II와 같이 배열 된다면, 아랫쪽의 음극은 다른 입자의 음극과 나란히 놓이게 되고, 양극은 양극과 나란히 놓이게 된다. 같은 극끼리는 서로 반발하므로 두입자는 반발력을 나타내게 되는 것이다. 물론 입자들이 서로 어떤 각도를 가지고 접근하게 되면 인력이나 반발력은 극단의 경우 때 보다는 작아지는 것이다. 일반적으로 두개의 입자를 연결하는 선이 수직에서 55°이내라면 입자들은 끌어당기며 그렇지 않을 때는 반발한다.

처음에 반발한다 하더라도 이동하는 두입자는 서로 원운동을 하며 돌게된다. 이들의 궤도곡선은 혜성의 궤도곡선과 마찬가지로 인력이나 반발력에 의해 그려진다. 동시에 입자들이 어느 방향으로 향하든 극들은 전극을 향해 위로든 밑으로든 향하게 된다. 이러한 힘들에 의해 모든 입자들은 실지로는 전하가 다른 극끼리 인접하는 모양으로 배열하게 된다. (그림 1을 보라) 인력이 우세하면 입자들은 밀집하게된다. 입자들이 이처럼 끝과끝이 계속 연결되면 진주줄에 맨것과 같이 긴 사슬을 이루게 된다. 이러한 거동은 섯가루가 자석막대의 자장을 따라 배열하는 모양과 같은 것이다. 전기유변성유체

에서 입자들의 사슬은 유체 그릇의 한 끝에서 다른 끝으로 빨리 성장한다. 이러한 사슬이 형성됨으로서 유체가 고체화하는 것이다. 어떤 입자들은 한 종류의 유체에 분산 되었을 때는 사슬을 쉽게 형성하나 다른 유체에 분산되면 사슬을 형성하지 않으며 과학자들은 아직도 널리 훑어져 있는 세부내용을 연구중에 있는 것이다. 한가지 가능한 복잡성은 유체의 분자자신이 분극될 수 있다는 것이다 유체의 분극도가 유체 내의 입자의 분극도와 꼭 일치하면 유체의 분극으로 입자의 분극은 가려지며 사슬은 형성되지 않는다. 일반적으로 전기유변성유체는 입자가 유체의 분자보다 쉽게 분극 될때 유효한 것이다.

그러나 사슬은 전기유변성유체에서 구조를 발전시키는데 중간 단계에 지나지 않는다. 단일 사슬은 인접되어 있는 평행사슬쪽에 이동하여 이들과 연결해 굵은 기둥을 형성하고 더욱 연결되어 자꾸자꾸 더 굵은 기둥을 형성하는 것이다. 그렇다면 최종 고체의 구조는 어떤 것인가? 최근의 이론적연구와 실험관측으로 답을 알게 된다.

첫째, 수많은 입자 주위에서의 복잡한 전장을 분석함으로써 예상되는 구조의 실마리를 찾을 수 있다. 이미 아는 바와 같이 쌍극자의 입자들은 서로 평행으로 있을 때 반발하므로 평행으로 있는 사슬로 된 기둥의 모양은 첫 보기에 이상하다. 왜 이러한 기둥들은 구성성분인 사슬로 분해하지 않는가? 입자들이 가까이 있는 사슬들에 의해서 뿐만 아니라 사슬에서 멀리 떨어져 있는 많은 입자들의 힘에 의해 끌리거나 반발되기 때문에 이러한 일은 일어나지 않는 것이다. 기둥들은, 쌍극자의 힘이 광범위(long-range)성이기 때문에 뭉쳐 있는 것이고 입자들은 유체 내의 모든 다른 쌍극자에서 나오는 모든 힘에 관계된다.

기둥들이 왜 뭉치는가를 알기 위해 사슬 근처에 있는 "시험" 입자를 생각하자. 시험입자는 사슬에서 나란히 배열된 입자들이 반발하는 것과 같이 가까이 있는 입자에 의해 반발된다. 그러나 시험입자는 입자의 위와 아래에 놓여 있는 사슬입자들에 의해 끌리게 되며 사슬의 상하에서 대부분의 입자가 가장 끌릴수 있는 55

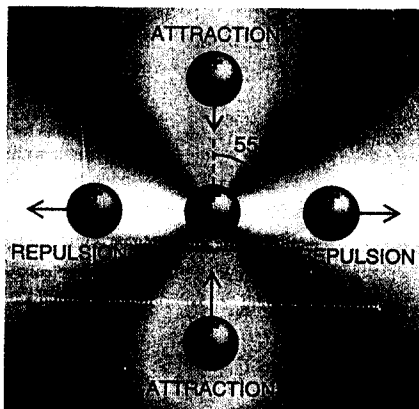


그림 1.

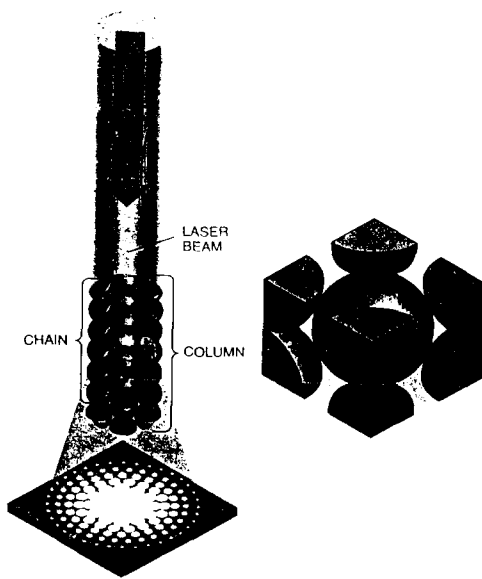


그림 2.

도의 구역내에 시험입자가 존재하기 때문이다. 더 정확히 말하면, 시험입자는 사슬에서 한 입자의 약간 왼쪽으로, 그리고 다른 입자의 약간 아래쪽으로 끌리게 된다. 따라서 많은 시험입자들을 사슬 근처에 배열하면 이것에 끌리게 되며 서로가 접근함으로써 제 2의 사슬, 제 3의 사슬 등을 형성하게 된다. 이와 같이 입자간의 쌍극의 힘은 사슬을 기둥으로 형성케하며 인접사슬에 있는 입자들이 겹치게 된다.

남일리노이 대학교의 첸(Tian-jie Chen), 지터(Robert N. Zitter), 타오(Rongja Tao)는 최근에 이러한 구조가 있음을 확인 하였다. 그들의 실험에 의하면 전기유변성 유체로 비교적 지름이 40  $\mu\text{m}$ 의 큰 유리알맹이를 실리콘 오일에 분산시킨 것을 사용했는데 전장을 가한 직후에 사슬이 형성되었다. 수분내에 사슬들은 뭉쳐서 지름이 약 6 mm가 되는 원통모양의 기둥을 이루었다.

과학자들은, 기둥을 빛을 투과할 수 있는 렌즈의 쌍임으로 간주하고 유리 알맹이의 초점 집중 성질을 이용해서 기둥의 구조를 확인하였다. 빛은 알맹이에서 알맹이로 전파되어 줄 밖으로 빠져나온다. 알맹이의 마지막층은 한 셋트

의 광원으로 작용하며 점들이 중복 되어지는 모양을 만들어 낸다(그림 참조). 이 모양을 분석함으로써 남일리노이 대학교의 연구팀은 고체화하는 전기유변성유체의 구조가 보통 알맹이의 배열이 체심정방 구조로 알려진 3차원적 배열임을 알았으며, 인접해 있는 사슬에서의 입자들이 정말로 중첩되어 있음을 알았다.

사슬사이의 인력이 이러한 격자를 형성하기에 충분히 강하다고 할지라도, 남일리노이 대학교팀이 관찰한, 비교적 빠르게 응집(수초내에)되는 현상을 인력만으로 설명하기는 어렵다. 실제 문제는 전기적인 힘으로 근사하게 해석하는 것보다 더 복잡한 것 같다.

실험시, 사슬은 불완전하기 때문에 기둥이 형성 되는 것이 기대한 것 보다는 빠르게 형성된다. 적어도 두가지 이유 때문에 입자 사슬들은 완전히 곧은 것도 아니고 정렬된 구조도 아닌 것이다. 첫째로 사슬은 가한 전극사이에서 완전히 곧게 뻗지 않고, 둘째로 입자의 브라운 운동에 의해 일부 형태를 갖는다. 1827년 스코트랜드의 식물학자인 브라운(Robert Brown)이 처음 관측한 브라운 운동이란 유체에 분산된 입자들이 쉘새 없이 제멋대로 움직이는 운동이다; 이것은 입자들과 한무리의 유체분자들 사이에서 충돌이 일어나므로 생기는 것이다.

전기유변성유체에서 분산된 입자들은 유체분자들과 모든 방향에서 충돌되므로 사슬에서 평균거리를 중심으로 해서 혼돈스럽게 움직이는 것이다. 이와 같이 사슬은 평균해서 곧다고 할 수 있을지라도, 어떤때는 브라운 운동에 의해 꼬여지는 것이다. 이 작은 변형에 의해 사슬간의 인력이 증가하며 사슬이 응집하여 줄을 이루는데 촉매 역할을 하게 된다.

기둥의 성장을 보다 잘 이해하기 위해 본 저자들은 산디아 국립실험소(Sandia National Laboratories)의 오디넥(Judy Odinek)과 함께 첸, 지터, 타오씨가 개발한 기술과는 전혀 다른 광학방법을 사용하였다. 비교적 큰 유리 알맹이로 구성된 사슬에 빛을 직접 통과시키는 대신에 레이저광을 사슬의 직각방향으로 겨냥했고, 알맹이크기도 훨씬 작은 것을 사용하였다. - 지름이 1 nm 보다 작은 것임. 이러한 입자들로 구성된

기둥에 의해 광이 산란되어 기둥의 간격과 폭을 알 수 있었다. 일반적으로 통과되어 나오는 광은 8자 모양을 만든다. 처음의 8자모양의 광은 크고 퍼진 모양이다. 기둥이 두꺼워지고 줄사이의 거리가 증가함에 따라 유체를 통과하는 광은 소수의 장애물과 부딪치게되며 더욱 밝아지는 것이다.

이러한 대강의 법칙에 의해 실험에서 본 광의 모양을 해석할 수 있다. 전장이 없어지고 시료에 사슬이나 기둥이 없다면 광은 균일하게 산란된다. 그러나 전장을 걸면 시료를 자극하는 광은 8자모양의 가운데 근처에서 더욱 밝아진다. 빛이 밝아지는 것은 기둥이 굵어지고 기둥사이의 거리가 더 넓어져 산란이 작아지기 때문이다. 기둥의 성장은 처음에는 매우 빨리 이루어지나 수분후에는 성장은 실지로 멈추게 되며 기둥사이의 인력이 계속 성장하기에는 힘이 너무 약하기 때문이다. 계산에 의하면 교체화 하는 유체는 기둥이 굵어짐에 따라 더 강하게 되기 때문에 이들 실험에 의하면 전장을 수분 동안 유지시키면 전기유변성유체의 기계적성질이 향상됨을 알 수 있다.

결국 이러한 유체는 기계적인 힘에 견디어야 하기 때문에 유체의 정적인 상태에서의 구조를 파악하는 것으로는 충분치 못하다. 즉 유체가 압축, 인장시에 내부구조가 어떻게 변하는가도 알아야 한다는 것이다. 그러한 문제들은 결국 유변학의 범주로 봉착되는데 유변학은 재료의 유동성(flow property)을 연구하는 것이다. 거의 모든 물질은 가끔은 매우 적은 압력으로도 그렇게 되지만, 교체라 하더라도 충분히 큰 압력이 작용되면 흐른다.

일반적으로 매우 딱딱한 물질들은 거의 흐르지 않는 반면 상당히 약한 물질들은 약간의 힘에 의해서도 흐른다. 유체의 유속에 영향을 주는 변수중의 하나가, 그것에 작용되는 응력이나 힘이다. 물과 같은 단순한 유체의 유속은 힘에 비례한다. 반면 유속은 유체의 점성이진한 정도에 반비례한다. 예를 들면, 걸쭉한 기름 같은 점성물질은, 힘을 가했을 때 물에 비해 천천히 흐르게 된다.

그러나, 전기장내에서의 전기유변성 유체의

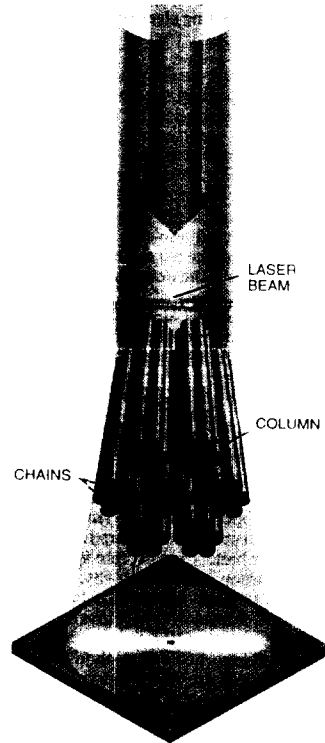


그림 3.

기둥은 그렇게 간단하지가 않다. 전기유변성유체는 빙함 플라스틱(Bingham plastics)으로 알려진 물질들의 거동과 흡사한 양상을 보인다. 어떤 일정한 힘 이하에서는 빙함 플라스틱은 전혀 흐르지 않는다. 이 한계값 이상이 되면 유속은 가한응력에서 한계응력을 뺀 값에 비례해서 증가하게 된다.

우리들 대부분은 아침에 치약을 사용할때마다 빙함 플라스틱을 접하게 된다. 이러한 형태의 유변학은 흐르지 않는 페이스트(paste)를 우리가 칫솔위에다 치약을 짜면 입구모양대로 치약이 나오는 '마개 흐름'(plug flow)이 생기게 한다. 치약에서와 같이, 전기유변성유체는 일정 한계응력까지는 저항하지만 그 한계응력 이상이 가해지면 흐르게 된다.

전극판이, 예를 들어, 하나는 오른쪽 또다른 하나는 왼쪽으로 움직일때, 전기유변성 유체에는 응력이 작용한다. 바로 이 힘을 전단응력이라 한다. 작은 힘을 가하면, 유체내 입자의 사슬들은

기울어지면서 장력을 받지만 끊어지지 않는다. 그러나 사슬들이 계속 기울어져 있을 때, 입자간 인력이 감소된다. 왜냐하면 사슬들이 전기장에서 더이상 위, 아래로 곧게 정렬되지 않기 때문이다. 대신에 사슬로 연결된 입자들은 경사진 배열을 유지한다. 그 배열은 입자들을 나란히 하고 더 가깝게 한다. 사슬들이 너무 심하게 기울어지면, 입자들은 상호간 당길 수 있는 영역을 벗어나므로 슬립(slip)이 일어난다. 그래서 사슬은 끊어지고 물질은 흐른다. 사슬 파괴시의 응력이 항복 응력(yield stress) 이다.

전기유변성 클리치와 같은 응용분야에서, 항복 응력을 최소화시키는 것이 매우 중요한 사항이 된다. 큰 항복 응력을 갖는 유체는 흐름이 일어나고 클리치가 슬립 되기전에 높은 토크(torque), 큰 회전력 등에 견디게 된다. 외부힘에 대한 유체의 저항력을 향상시키는 방법중에 하나는, 물질에 고전압을 가하는 것이다. 입자의 쌍극자에 있는 양전하와 음전하 사이에 생겨난 '분리량(The amount of separation)'은 가한 전장에 비례해서 증가하며, 입자간의 인력은 이 전하 분리량의 제곱에 비례하게 된다. 따라서 항복응력은 가한 전압의 제곱에 비례한다. 그러나 전압을 증가시키는 것은 전력소비를 증가시키고, 전기 유변성 유체에 열을 발생 시킨다. 그 유체가 너무 뜨거워지면, 분해 될 수도 있다. 그래서, 단단한 전기유변성 유체를 구현 하고자 할 때, 하나의 목표는 주어진 항복응력을 얻는데 필요한 전압을 최소화시키는 것이다.

이 전압은 입자의 분극률(polarizability)에 크게 의존한다. 몇년전만 해도 고체화된 유체의 강도가 분극률과 비례해서 그렇게 증가한다고 생각하지 않았다. 산디아 국립실험소(Sandia National Laboratories)의 아돌프(Douglas B. Adolf), 앤더슨(Robert A. Anderson), 가리노(Terry J. Garino) 그리고 한스(Bradly G. Hance)에 의해 주도된 고 분극성 세라믹 입자의 연구덕택에 우리는 많은 것을 알게 되었다. 연구자들은 강도(strength)가 분극이 증가됨에 따라 극적으로 증가됨을 알았다. 그것은 고분극성 입자들이 매우 강도가 높은 전기유변성 유체를 이루는데 큰 몫을 할 것이라는 상당한 낙관론을

심어 주었다.

전기 전도도 또한 고려의 대상이 된다. 가한 전기장이 1/100초 이상 유지된다면, 입자와 액체 용매간의 전기전도도의 차이는 매우 심각한 문제가 된다. 약간의 전도성을 갖는 액체속에 분산된 비전도성 입자를 생각해 보자.

전장이 가해진 후 즉시, 입자들은 분극 될 것이다. 그러나 전하들은 액체를 통해 흐르기 시작하고, 분극된 입자표면에 축적 될 것이다. 그 후 곧, 입자간 상호인력(interaction)은 그들의 진성분극에 의한 것이 아니라 액체내의 각 입자를 싸고 있는 전하의 구름들에 의해서 결정 지워질 것이다. 입자간의 기본적인 힘은 여전히 쌍극자에 의한 것이다. 그러나 이힘의 미시적인 근원은 다르며, 항복응력도 다를지도 모른다.

다른 문제들은 절연성 액체에서 전도성 입자들의 경우 생겨난다. 전도성 입자들이 분극될 때, 음으로 하전된 전자들은 분자들 내부로만 이동하는 것이 아니라 입자를 가로질러 분자에서 분자로 활발히 이동한다. 그래서 강한 분극과 상호인력을 만들어 낸다. 그러나 입자들이 서로 접촉되어 있다면, 전하들은 입자들 사이로 흐른다. 그러한 경우, 입자들중 하나는 순양전하를 띠고 다른 하나는 음전하를 띠 것이다. 전극들은 어떤 하나의 작은 입자 보다 더 강한 인력을 발휘하기 때문에 입자들이 함께 묶이지 않고, 이러한 입자들은 반대전극쪽으로 이동하게 된다. 이러한 현상은 전도성 입자의 현탁액에서 나타나며, 흔히들 튀는공의 효과(bouncing ball effect)로 거론 되기도 한다. 전도성 입자들간 전하의 교환은 입자를 절연층으로 코팅하여 막을 수 있다. 그러한 코팅을 하면 입자를 고분극화시킬 수 있고, 그 결과 유체는 강력한 전기유변성 효과를 보이게 된다.

전기유변성 유체에서 높은 항복응력만이 유용한 것은 아니다. 어떤 응용분야에서는 치약같은 유체는 적은 응력에서 항복 되어야 하고, 그러나 응력 증가에 따른 움직임의 저항은 계속 되어야 한다. 그러한 유체의 점성 변화를 조절하기위해, 항복을 일으키고 흐르기 시작한 후의 전기유변성 유체의 거동에 대한 이해가 필요하다. 그래서 우리와 몇몇 연구팀들은 유체가 응

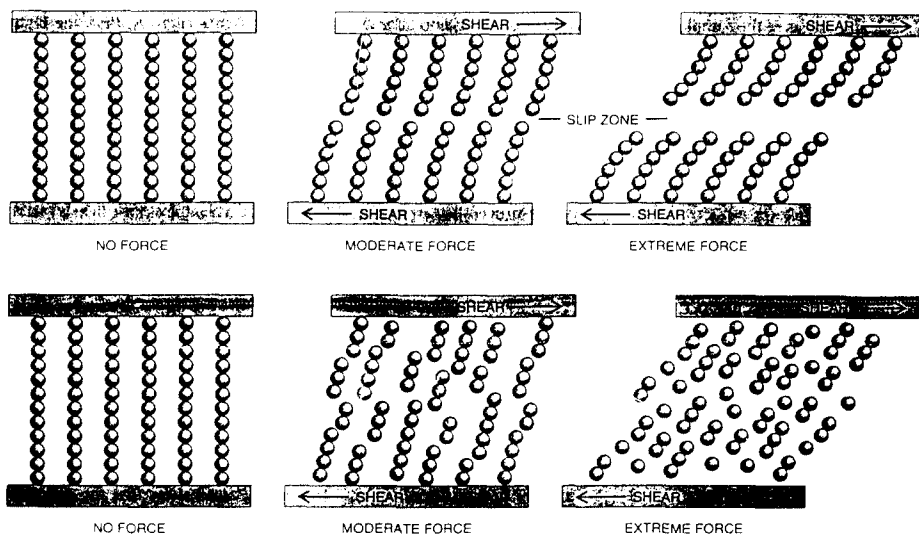


그림 4.

력을 받음에 따라, 어떤 구조로 전개되는 가에 대한 연구를 하고 있다. 우리가 연구하는 것들은, 이러한 구조들이 유체가 분산되어 있는 액체의 흐름을 어떻게 저지 시키는가, 그리고 어떻게 이러한 흐름이 액체가 계속 흐르도록 고체구조를 왜곡시키고 약화 시키는가에 대한 것 등이다.

이제까지 포괄적인 이론은 없다. 어떤 연구자들은 옥수수전분 유체를 관찰한 것을 기반으로 전기유변적 흐름의 모델을 제안한 반면, 우리는 다른 유체들에 대한 실험을 통하여 그 점성력이 있고, 저항력을 갖는 흐름에 대한 다른 견해를 갖고 있다.

위스콘신 대학(The University of Wisconsin)의 클링겐베르그(Daniel J. Klingenberg)와 일리노이 대학(The University of Illinois)의 추코스키(Charles F. Zukoski)는 항복응력보다 큰 응력을 가했을 때 옥수수전분 전기유변성 유체의 흐름에 대해 연구했다. 그들은 전극들을 전단(shearing)하면 두 종류의 구조가 생겨남을 알아냈다. 전극판 가까이에는 입자들이 기울어진 기둥을 형성하고, 판 사이의 중간 영역에서는 사슬이 끊어지고, 유체가 자유롭게 움직이는 '미끄럼영역(slip zone)'이 이루어진다. 전단속도가 증가될수록 미끄럼영역은 그폭이 넓어지고, 판에 달려 있는 기울어진 기둥들의 상대적 움

직임을 원활하게 한다(그림 4).

아돌프와 연구하면서, 우리는 전기유변성 유체의 전단에 대한 또다른 모습을 제안했다. 그것은 기둥들이 전극에 고착되는 것이 지배적이지 아니라는 것이다. 만일 기둥들이 자유롭게 떠다니면, 입자들간의 서로 당기는 힘 때문에 기둥들이 전극에 수직으로 정렬되려고 할 것이다. 하지만 흐르는 유체는 기둥들을 회전시켜 기둥들이 전극, 그리고 흐름방향에 평행하도록 할 것이다. 이와 같이 유체의 흐름으로 인해서 생겨나는 힘을 점성력(viscous force)이라 한다. 기둥이 약간의 각을 가지고 기울어졌을때, 흐름에 평행하게 사슬들을 회전시키려는 점성력은 그들을 수직하게 유지시키려하는 전기적인 힘과 균형을 유지한다. 우리는 전단응력에 의해 유체가 항복점을 지나 흐르게 되었을 때, 유체 전체를 통해서 그러한 기울어진 기둥들을 볼 수 있으리라 예상하고 있다.

그리고, 우리는 기둥이나 사슬들이 전단속도가 증가함에 따라 짧아지리라 생각한다. 긴 사슬은 짧은 것 보다 표면적이 더 크므로 점성력이 긴 사슬에 더 많이 작용한다. 실제로, 강한 점성력은 입자들이 서로의 인력을 생기게 하는 각 이상으로 매우 긴 사슬들을 회전시킬 것이다.

따라서 입자들이 반발력을 일으키기 시작할

때 사슬들은 끊어지게 된다. 이러한 현상은 주어진 전기장, 전단속도에서 나타나는 사슬길이에 대한 상한계선을 그어준다. 그럼에도 불구하고, 이러한 비교적 짧은 사슬들은 유체의 점성도를 급격히 증가시킨다. 이 상황은 솔잎으로 채워진 파이프를 통해서 물을 펌프질 하는 것과 유사하다.

물이 미세한 망을 통해 밀어제치고 나아가야 한다는 사실은 일정 흐름속도에 도달하는데 필요한 힘을 증가시킨다는 것이며, 솔잎에 결합된 물은 높은 점성도를 갖는다. 그것은 마치 항복 응력이상에서 전기유변성 유체가 거동하는 것과 같다.

아마 클링겐베르그와 우리 이론은 많은 전기유변성 유체의 거동을 설명해 줄 수 있을 것이다. 전극 가까이에서는 고체화된 전기유변성 격자의 휴지(rest)상태와 비슷한 비교적 정적인 상태가 되고, 중간 영역에서는 이 구조들은 입자들이 더 짧고 기울어진 사슬들로 끊어지게 되는 것이다.

오늘날 전기유변성 유체는 더이상 1940년대에서 처럼, 아주 단순한 혼합체로 간주되지는 않는다. 전기유변성 유체는 현탁액과 입자들 뿐만 아니라 분산제, 활성화제 등을 종종 포함한다. 분산제는 전기장이 가해지지 않을때 입자들이 서로 붙어 버리지 않도록 한다. 분산제가 첨가되지 않고, 전기장세기가 '0' 이더라도 입자들은 때때로 서로 뭉쳐버려 제대로 분산되지 못할 때가 있다. 그렇게 수시로 변하는 유체는 쓸모가 없다. 활성화제로 물 혹은 알코올을 쓰는데, 종종 불순물(대개 용해된 염)이 들어 있다. 활성화제가 작용하는 메카니즘은 아직은 불분명하다. 그러나 대개 기름진 현탁액에 의해 반발력을 받는 물이 입자표면위에 모인다. 용해된 염은 전기장에 의해 분극 되어 입자들의 진성(intrinsic) 분극에 전하를 제공한다.

이러한 표준공식은 구조적인 약점이외에 두 가지 문제점이 있다.

첫째, 전기유변성 효과의 강도는 입자크기에 비례하므로 입자 크기가 1 nm 이상인 것이 좋다. 그러나 큰입자들은 유체의 바닥에 가라 앉는다. 또한, 큰 입자를 가진 유체가 작은 입자의 유

체보다 마찰이 크다.

둘째, 물과 같은 활성화제는 기화하거나 다른 성분과 화학반응을 일으켜 짧은 작동수명을 갖게 되는데, 특히 고온에서 심각하다.

윈스로우에 의해 개발된 1세대 전기유변체는 습한 공기에 노출시켜 축축하게 유지 되었고, 모래같은 실리카 입자를 포함하고 있다. 약 10여년전 스트랑그룸(James E. Strangroom)과 영국의 크란필드공대팀(Cranfield Institute of Technology)에서는 고분자로 만들어진 입자를 가지고 마모성이 작은 2세대 전기유변성 유체를 발전시켰는데, 그것은 여전히 물을 포함하고 있었다.

지금 진행중에 있는 다음 단계에서는 작고, 고분극화되는 입자들을 지닌, 물이 포함되지 않는 3세대 유체를 만들어 내는 것이다.

그동안 전기 유변적 장치를 사용하게 될 기계들 또한 1940년대 이후 계속 변화해 왔다. 자동차 산업에 있어 매우 빠른 반응시간을 갖는데 적합한 물질은 여전히 큰 관심거리가 된다. 그러나 그것은 반세기 전에는 없었던 산업분야였던것이다. 오늘날에는 간단한 로봇트가 우리의 공업적인 작업을 도맡아 하고 있다.

반도체 기술의 최근 발전이 몇세대동안 공상과학소설가들에 의해 상상된 로봇트학의 발전을 초래했다면, 빠른 마이크로 프로세서와 그에 상응하는 기계적 제어를 짝지워질 수 있는 적합한 물질은 앞으로의 과학발전에 결정적 역할을 할 것이다. 인간에게는 아주 평범한-말하자면, 야구공을 잡는것 같은-행동을 수행하기에 충분히 능숙한 로봇트에게는 전기유변유체의 빠른 반응시간의 장점을 이용하는 수역학 시스템(Hydraulic system)이 필요할 것이다.

우리는 운동선수들을 대체할 로봇트가 필요하지는 않다. 그러나 예를 들면 집적회로(Integrated circuit)를 연결시키는데 사용되는 미세한 금속선을 뽑아낼 수 있는 컴퓨터 제어 장치를 상상해 보라 '스풀(spool)'에서 섬세한 선을 감을 때, 로봇트는 정확히 장력을 제어해야 할 것이다. 즉, 기계가 장력의 제일 작은 변화를 감지하고 반응하지 못하면 선은 밑으로 처져 버리거나 끊어질 것이다.



빠른 전기유변성 클러치와 같은 그러한 장치는 이미 본보기적으로 시험되어 왔다. 그리고 다른 것들도 계속적으로 나올 것이다. 예를 들면, 고도로 정밀하게 잠겼다가 곧 풀렸다하는 초인

간(super human)의 관절 등이다. 그것들은 T-1000과는 적수가 되지는 못하지만 기술시장에서는 강력한 경쟁자가 될지도 모른다.