

사실적인 물감 표현을 위한 유체 시뮬레이션 연구

한국과학기술원 | 김지환 · 유 미 · 차승훈 · 노준용*

1. 서론

물감에 의해서 만들어지는 효과들을 표현하기 위해서 그동안 많은 연구들이 활발히 진행되어 왔다. 특히 비사실적 렌더링 분야에서 그러한 노력들을 많이 볼 수 있다. 물감은 유체의 한 종류로 볼 수 있으며, 그렇기 때문에 유체 시뮬레이션 분야의 연구들에서 본 연구와 긴밀한 관련성을 찾아 볼 수 있다. 유체 시뮬레이션은 크게 라그랑지안 방식의 파티클 시뮬레이션과 오일러리안 방식의 그리드 시뮬레이션으로 나눌 수 있다. 라그랑지안 방식은 유체 시뮬레이션 생성을 위해 파티클을 통해서 속도를 계산하는 방법으로, 계산된 속도를 직접적으로 파티클에 적용시켜 다음 위치 값으로 이동시키는 방식이다. 오일러리안 방식은 개별의 유체 파티클 대신 압력, 속도 등의 장(Field)을 오일러 격자 안에서 정의하고, 시간이 지남에 따라 격자 내부의 각각 셀(Cell)의 위치에서 유체의 장을 계산하는 방식이다.

본 고에서는 라그랑지안 방식의 물감 시뮬레이션과 오일러리안 방식의 물감 시뮬레이션에 대한 각각의 연구 사례에 대해 알아보도록 한다. 2장에서 먼저 물감 효과의 연구동향을 소개하고, 3장에서 You[1] 등이 제안한 라그랑지안 방식의 파티클 기반 물감 시뮬레이션을 소개한다. 이 연구는 유체성, 확산성 및 흡수성을 바탕으로 하여 사실적인 물감의 특성을 표현하였다. 4장에서는 Cha[2] 등이 제안한 오일러리안 방식의 물감 확산 모델 연구를 소개한다. 점지 현상(Viscous Fingering)은 섞일 수 있는 유체들을 혼합할 때 사실적인 확산을 나타내기 위한 매우 중요한 요소이다. 이장에서는 유한확산 집합체(DLA)를 이용하여 점지 현상을 효율적으로 표현하는 방법을 소개한다.

2. 물감 효과 연구 동향

NPR 분야에서, 유체 시뮬레이션을 이용하여 물감 효과를 표현하는 많은 연구가 진행되었다. 화선지와 같

은 종이 위에서의 물감의 확산을 표현하기 위해 Chu와 Tai[3]는 유체 흐름 모델을 격자 Boltzmann 방정식에 기반 하여 제시하였다. 비슷하게, Sun 등[4]은 Brownian Motion과 모세관 효과를 이용하여 수목화의 효과를 표현하였다. 이와는 다른 접근으로 Curtis 등[5]은 얇은 유체 시뮬레이션과 Kubelka-Munk 모델을 사용하여 다양한 수채화 효과를 구현하였다. 두꺼운 유화나 아크릴화 스타일의 효과를 재현하기 위해 Bexter 등[6]은 viscous 물감 모델을 이용하여 상호작용 가능한 물감 시스템을 제안하였다. 비록 이러한 방법들로 다양한 물감의 효과를 표현 할 수 있었지만, 실제 물감이 갖고 있는 고유한 물리적 성질을 고려하지 않았고, 물감의 3차원 입체적 표현은 불가능 하였다.

주목해야 할 또 다른 물감의 특성은 서로 다른 유체들 간의 확산 현상이다. Park 등[7]은 Chan-Hillard 방정식을 적용하여 Phase Field의 확산을 구하고 이를 통해 섞이고 섞이지 않는 유체 시뮬레이션 통합 프레임워크를 소개하였다. Kang 등[8]은 Distance Function과 Volume Fraction을 이용하여 이러한 효과를 재현하려 시도하였다. Shin 등[9]은 서로 다른 유체의 경계에서의 확산을 다뤘다. 특히 점지 현상을 표현하기 위해 Darcy's Law를 적용하여 물감 퍼질 때 유체의 표면 근처의 확산을 물리적으로 표현 하였다. 하지만 실제 물감이 물 속 에서 확산되는 과정에서 관찰되는 특징적인 움직임의 결과인 필라멘트 효과를 만들어 내는 데에는 부족한 면이 있다.

3. 파티클 기반 물감 시뮬레이션

관찰을 통하여 현상의 물리적 성질을 시뮬레이션 하는 것은 매우 중요하다. You 등은 실제 페인팅 환경을 주의 깊게 관찰한 후, 그 결과를 반영하는 물감 시뮬레이션 시스템을 설계함으로써 기존 유사 연구들과 차별화 하였다. 이 장에서는 물감의 특성을 유체성, 확산성, 흡수성 등 세 개의 주요한 물리적 성질로 나누어

사실적인 물감의 효과를 표현한 You 등[1]의 라그랑지안 방식 시뮬레이션을 소개 한다.

아티스트들은 그림을 그리기 위해서 물감과 용제를 사용한다. 실제 물감은 색을 결정하는 작은 입자인 색소(Pigment)와 이 색소들을 결속시키고 운반하는 무색의 바인더로 구성된다. 물감의 종류는 이 바인더에 의해 수채화 물감, 유화 물감 등으로 결정된다. 용제는 그림을 그릴 때 사용되는 물, 기름과 같은 액체 성분의 유체이다. 바인더에 의한 물감의 결속은 용제와 섞이면서 분해되는데, 이 용제들은 물감을 희석하여 종이나 캔버스에 바르기 쉽게 한다. You 등은 실제 페인팅을 관찰을 통해 실제 물감이 다음과 같은 물리적인 특성을 보인다는 것을 확인하였다.

- **유체성** : 물감과 용제는 액체이므로 유체역학에 의해 운동한다. 하지만, 용제와 달리, 물감은 점탄성[10]이다.
- **확산성** : 물감과 용제가 섞일 때 농도에 따라 물감의 색소가 용제로 확산된다.
- **흡수성** : 시간이 흐르면서 용제와 소량의 바인더는 종이에 흡수되고 종이의 입자간 간격보다 입자가 큰 색소만 남게 된다.

3.1 페인트 시뮬레이션 모델

You 등은 기본 물감 시뮬레이션으로 PCISPH(Predictive Corrective Incompressible SPH) 방식[11]을 채택하였다. PCISPH는 라그랑지안 방식의 SPH(Smoothed-Particle Hydrodynamics) 알고리즘 중 하나로써 계산속도가 빠른 장점이 있다. 물감이 대표적인 점탄성 물질임에 착안하여 물감의 움직임을 사실적으로 표현하기 위해 점탄성을 함께 적용하였다. 물감이 용제와 섞일 때 바인더와 염료의 결합은 느슨해지고 염료는 물감에서 용제로 확산하게 된다. 초기 상태의 물감 파티클은 개별 색소농도를 보유하고 용제 파티클은 색소농도를 갖고 있지 않다. 확산 공식에 따라 색소농도가 페인트에서 용제로 천천히 이동하게 된다. 마지막으로

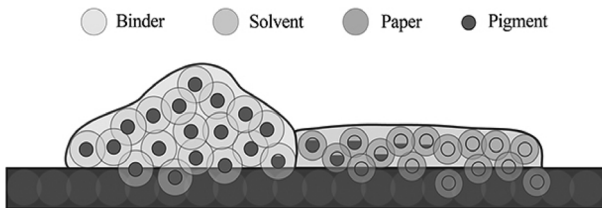


그림 1 시스템 개요. 초록색(작은 원의 채워진 정도)은 피그먼트의 농도를 나타낸다

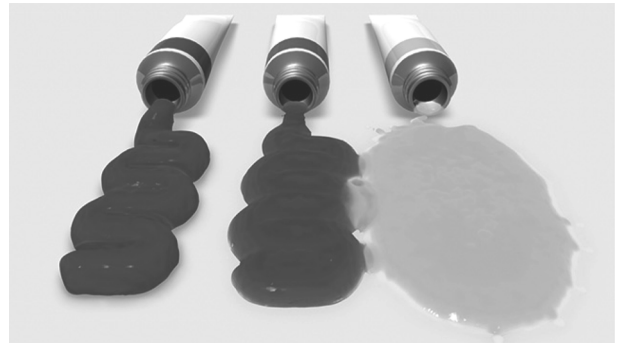


그림 2 점탄성(빨강), 점성(초록), 기본 유체(노랑)

종이로의 흡수를 계산하기 위해 흡수성에 따른 파티클 침투거리를 계산하게 된다. 그림 1은 이러한 단계를 설명한다.

3.2 유체성, 확산성, 흡수성

SPH 방식은 각각의 파티클에 있는 변수들을 주변 파티클로부터 보간 하여 계산하는 방법이다. 파티클을 유체의 속도에 따라 움직이게 하기 위해서는 기본적으로 Navier-Stokes 식을 사용해야 한다. You 등은 물감의 움직임을 위해 점성 및 탄성 힘을 기본 지배 방정식에 적용하였다. 그림 2는 각각의 성분의 존재 유무에 따른 유체의 다른 모습들을 보여준다.

속도를 전달하는 운동량 전달과는 달리 물질 전달(mass transfer)은 페인트와 용제의 농도 차에 의해 움직이기 때문에 정지된 유체에서도 확산은 수행된다. 물질 전달은 농도 차를 최소화하기 위해 고농도에 분포되어 있는 물질이 저농도의 지역으로 이동하는 것으로 이를 표현하기 위해 Fick's Second law[12]를 적용하였다.

페인트와 용제가 종이와 접촉 할 때 흡수작용이 일어나게 된다. 기존의 많은 연구들은 확산이나 천과 같은 흡수성이 매우 높은 재질에서의 시뮬레이션을 연구하였기 때문에, 흡수와 확산 단계가 하나의 단계에서 모두 계산되었다. 관찰 결과, 확산은 유체 내부에서만 일어나고, 종이로의 흡수는 유체와 접촉한 부분에서만 일어난다. 접촉 부분에서의 침투 거리를 계산하기 위해 You 등은 Lucas-Washburn 식 [13]을 사용하였다.

3.3 결과

You 등이 제안한 물감 시뮬레이터는 다양한 타입의 그림을 생성할 수 있다. 그림 3은 용제를 사용하지 않고 높은 점탄성을 보유하고 있는 바인더만을 이용하여 아크릴 물감 고유의 특징을 표현하였다. 한편, 그림 4에서는 낮은 점탄성을 보유하고 있는 용제를 이용함으로써 수채화와 같은 얇고 투명한 이미지를 생



그림 3 아크릴화 결과

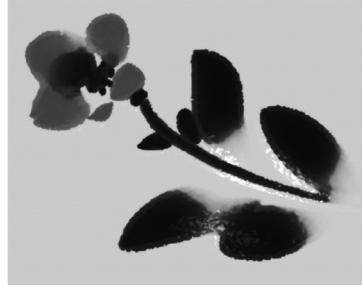


그림 4 수채화 결과

성할 수 있었다. 또한 높은 확산도와 흡수도를 적용하였기 때문에 물감에 있던 염료가 아크릴화와 비교하여 더 빠르게 확산하였으며, 대부분의 용제가 중이에 흡수되었다.

4. 그리드 기반 효율적인 물감 확산모델

이 장에서는 DLA를 이용하여 물감과 유체간 섞임에서 생겨나는 손가락 모양의 점지현상(Viscous Fingering)을 사실적으로 표현한 오일러리안 방식의 시뮬레이션[2]을 설명하고자 한다. Cha 등은 실험을 통해, 물리학에서 다양한 응집 현상을 모델링하는데 자주 사용하는 DLA를 유체 시뮬레이션에 적용하는 것이 실제 물감을 확산시켜주는 필라멘트 효과를 표현하는 점지 효과를 만들 수 있다는 것을 알아내었다. DLA를 활용하면, 확산을 주요한 전달 수단으로 사용하는 시스템에서 클러스터의 성장을 효율적으로 예측할 수 있다. 하지만, 속도나 힘의 개념을 갖고 있지 않아 DLA를 유체 방정식에 통합하는 시도는 존재하지 않았다. 이에 Cha 등은 Linear feedback system을 적용한 패스(path) 기반 유체 컨트롤 메소드를 고안하여 유체 밀도를 대류 시키는 외력을 만들어 내었다.

4.1 접근 방법

개발된 방법은 크게 세 개의 단계로 나누어지는데,

첫 번째 단계에서는 DLA를 이용하여 파티클 트리(Particle Tree)를 생성하고, 이 트리를 기반으로 유체의 움직임을 제어할 영역을 생성한다. 두 번째 단계에서는 파티클 트리를 이용하여 첫 번째 단계에서 결정한 영역에 방향 성분을 결정한다. 마지막 단계에서는 유체 시뮬레이션을 진행하면서, Linear feedback system을 이용하여 유체 움직임을 컨트롤할 외력을 생성해 낸다. 이에 대한 전반적인 프로세스는 그림 5에 설명되어 있다.

4.2 점지 모양 형성

이 연구에서 파티클 트리의 성장을 표현하는 데에 DLA를 이용하였다. Bogoyavlenskiy[14]의 모델을 사용하여 파티클 트리를 생성하고 이를 통해 점지 효과의 모양을 형성한다. 이렇게 생성된 파티클 트리에 대해 이미지 프로세싱 분야에서 오래전부터 사용되는 dilation과 erosion기법을 이용하여 유체가 흐르는 영역을 설정한다. 이 때 시뮬레이션에서 사용되는 격자 공간은 이미지의 공간에서 사용되는 픽셀처럼 취급된다.

4.3 Linear feedback system을 이용한 유체 컨트롤

생성된 영역 안에 유체의 흐름을 제어하기 위한 방향 성분들을 추가하게 되는데, 방향 성분은 DLA 파티클 트리의 성장 방향으로 결정한다. DLA를 이용한 파티클 트리의 각 파티클 방향이 정해졌다면 유체를 이

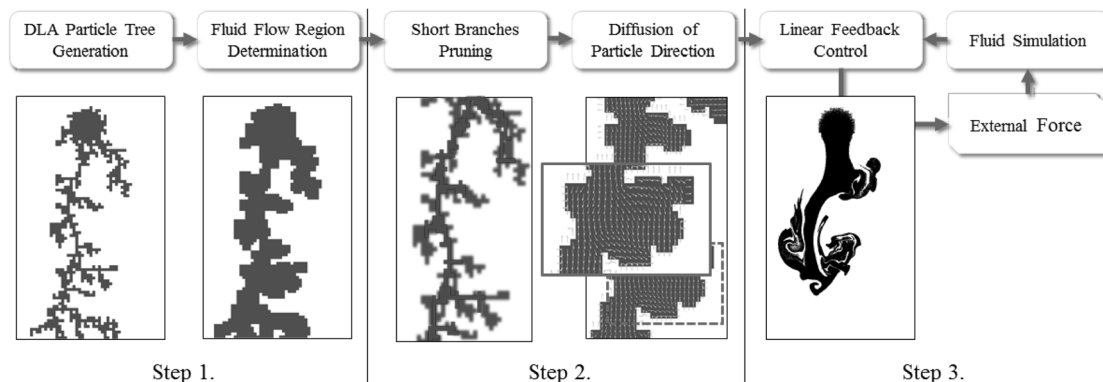


그림 5 전반적인 프로세스

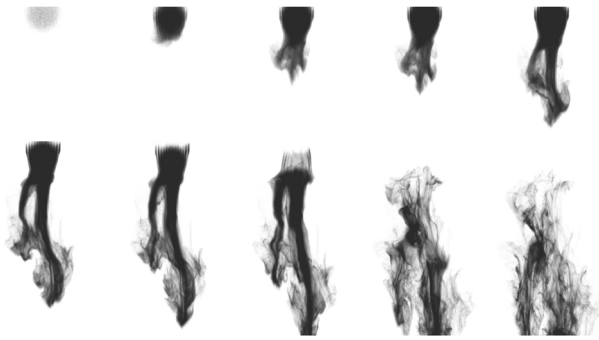


그림 6 점지 현상 생성 결과

방향을 따라 이류 시켜야 한다. 이 연구에서는 Gunzburger와 Manservigi[15]가 발표한 Linear feedback system을 활용하여 현재 유체의 속도를 목표로 하는 속도로 맞춰줄 외력을 생성하였다. 이렇게 생성된 외력으로 사용자는 현재 유체의 흐름을 제어할 수 있다.

4.4 결과

그림 6은 위의 방법으로 점지 현상을 시뮬레이션 한 결과이다. 실험은 $100 \times 100 \times 100$ 의 낮은 해상도의 격자를 이용하였다. 높은 해상도의 격자를 사용하지 않아도, 그림에서 알 수 있듯이 실제 물감의 확산에서 볼 수 있는 여러 가닥의 작은 필라멘트를 확인할 수 있었다. 더욱이 Step 1에서 형성된 파티클 트리의 모양으로 결과를 예측할 수 있어 실제 시뮬레이션 전에 원하는 점지 모양을 미리 생성할 수 있다.

5. 결론

본 고에서는 사실적인 물감 표현을 위하여 유체 시뮬레이션을 적용한 최근 연구들을 분석하고, 그 중 유체 시뮬레이션의 서로 다른 두 가지 방향에 대한 사례에 대해 살펴보았다. 비록 두 사례가 각기 다른 유체 시뮬레이션 기법으로 제안되었지만, 관찰을 통해 실제 물감이 갖고 있는 고유한 물리적 성질을 적용하였다는 공통점이 있다. You 등의 연구에서는 색소, 바인더, 용제, 종이의 실제 페인팅 요소들을 시뮬레이션에 적용하였고, Cha 등의 연구에서는 실제 물감의 확산에서 볼 수 있는 필라멘트 효과를 적용하였다.

지금까지 물감 표현과 같은 NPR 분야에 유체 시뮬레이션을 적용시킴으로써 좀 더 실제와 같은 결과를 얻을 수 있는 연구들을 알아보았다. 이와 같이 현상을 모델링 하고 시뮬레이션 하여 좀 더 실제적인 자연현상을 재현 하는 연구들은 계속 발전 중이다. 앞으로 고성능 컴퓨터 연산이 가능하게 되면 그동안 시도해보지 못했던 더 많은 요소를 고려하고, 더 커다란 규모의 유

체 관련 실제 현상들을 시뮬레이션 하는 것이 가능해질 것이다.

참고문헌

- [1] M. You, T. Jang, S. Cha, J. Kim, J. Noh, "Realistic paintsimulation based on fluidity, diffusion, and absorption", *Computer Animation and Virtual Worlds*, Vol. 24, pp. 297-306, 2013.
- [2] S. Cha, J. Park, J. Hwang, J. Noh, "An efficient diffusion model for viscous fingering", *The Visual Computer*, 28, 2012.
- [3] N. Chu and C.-L. Tai. "Moxi: realtime ink dispersion in absorbent paper", *ACM SIGGRAPH 2005*, pp. 504-511, 2005.
- [4] M. Sun, Z. Wang, and J. Sun, "Physical modeling based graphical simulator of water-ink diffusion and multi-stroke superposition", *Multimedia Technology (ICMT)*, pp 1-7, Ningbo, 29-31 Oct. 2010.
- [5] C.-J. Curtis, S.-E. Anderson, J.-E. Seims, K.-W. Fleischer, and D.-H. Salesin, "Computer-generated watercolor", *SIGGRAPH '97*, pp. 421-430, 1997.
- [6] W. Baxter, Y. Liu, and M.-C. Lin, "A viscous paint model for interactive applications: Research articles", *Comput. Animat. Virtual Worlds*, 15:433-441, 2004.
- [7] J. Park, Y. Kim, D. Wi, N. Kang, S. Shin, and J. Noh, "A unified handling of immiscible and miscible fluids", *Comput. Animat. Virtual Worlds*, 19:455-467, 2008.
- [8] N.Kang, J. Park, J. Noh, and S. Shin, "A hybrid approach to multiple fluid simulation using volume fractions", *Computer Graphics Forum*, 29:685-694, 2009.
- [9] S. Shin, H. Kam, and C. Kim, "Hybrid simulation of miscible mixing with viscous fingering", *Comput. Graph. Forum*, 29(2):675-683, 2010.
- [10] T.-G. Goktekin, A.-W. Bargteil, and J.-F. O'Brien, "A method for animating viscoelastic fluids", *ACM Trans. Graph.*, 23(3):463-468, 2004.
- [11] B.Solenthaler and R. Pajarola, "Predictive corrective incompressible SPH", *ACM Trans. Graph.*, 28(3):40:1-40:6, 2009.
- [12] J. Welty, C.-E. Wicks, G.-L. Rorrer and R.-E. Wilson, "Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer", Wiley, 2007.
- [13] E.-W. Washburn, "The dynamics of capillary flow", *Phys. Rev.*, 17:273-283, 1921.
- [14] Bogoyavlenskiy, "Mean-field diffusion-limited aggre-

gation: A "density" model for viscous fingering phenomena", Phys. Rev. E 64, pp.066-303, 2001.

- [15] Gunzburger, M., Manservigi, S., "Analysis and approximation for linear feedback control for tracking the velocity in navier-stokes flows", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 189(3), pp.803-823, 2000.
- [16] Kim, Y., Machiraju, R., Thompson, D., "Path-based control of smoke simulations", Proceedings of ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation, pp. 33-42, 2006.

약 력



김지환

2012 아주대학교 전자공학부 학사
2012~현재 KAIST 문화기술대학원 석사과정
관심분야 : image processing, physically-based simulation
E-mail : mizeloble@kaist.ac.kr



유미

2007 홍익대학교 회화과 학사
2007 홍익대학교 애니메이션과 학사
2009 KAIST 문화기술대학원 석사
2009~현재 KAIST 문화기술대학원 박사과정
관심분야 : fluid simulation, rendering
E-mail : anubodhih@kaist.ac.kr



차승훈

2010 동국대학교 컴퓨터 공학과 학사
2012 KAIST 문화기술대학원 석사
2012~현재 KAIST 문화기술대학원 박사 과정
관심분야 : image processing, physically-based simulation
E-mail : seunghoon.cha@kaist.ac.kr



노준용

1993 B.S. in Electrical Engineering, USC
1996 M.S. in Computer Engineering, USC
2002 Ph.D in Computer Science, USC
2003~2006 Graphics Scientist, Rhythm&Hues Studios
2006~2009 KAIST 문화기술대학원 조교수
2009~현재 KAIST 문화기술대학원 부교수
관심분야 : facial modeling/animation, character animation, fluid simulation, stereoscopic visuallization
E-mail : junyongnoh@kaist.ac.kr